

Universidad de Almería

Escuela Superior de Ingeniería

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial



Sistema de control del crecimiento del cultivo mediante iluminación LED

Alumno: Jesús Rodríguez Montes

Directores:

Nuria Novas Castellano

Miguel Urrestarazu Gavilán

Junio 2019

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a todos los profesores que me han inculcado sus conocimientos a lo largo de estos años, le doy gracias especialmente a mis tutores Nuria y Miguel por haberme ayudado a realizar este trabajo que comenzó como una simple idea.

A mí familia en especial a mis padres ya que gracias a ellos he podido tener una buenísima educación. A mis tíos por ayudarme durante todos estos años y a mí hermano que me guió y aconsejó en todas las asignaturas.

Por último, mencionar a mis amigos y compañeros de clase que me han ayudado siempre.

Resumen

El presente trabajo surge de la necesidad de abaratar los costes de cultivo en regiones del mundo donde las horas de luz escasean, además se pretende incrementar la cantidad de producto que se obtiene por planta. La hipótesis de partida es que un control de la intensidad y longitud de onda proporcionada a la planta durante el proceso de crecimiento puede tener un efecto positivo sobre el desarrollo del cultivo. Para ello se ha desarrollado un sistema capaz de controlar la intensidad y longitud de onda con la que se irradia la planta. Mediante el uso de un microcontrolador de entorno Linux, se ha implementado un código en Python, el cual se encarga de regular la intensidad y la longitud de onda que le llega a la planta en cada momento. El sistema realiza las siguientes funciones como el control de la adquisición, almacenamiento y grabado de los datos y el control remoto del sistema desde cualquier dispositivo. El resultado ha sido un sistema adaptable y mucho más potente que los existentes además de más eficiente en términos energéticos. El experimento se realizó con plantas de lechuga que se recolectaron 20 días después del trasplante. Los tratamientos de lámparas LED consistieron en: luz RGB artificial (T3) y dos lámparas para uso en horticultura cuyo espectro se ajusta más a la máxima eficiencia fotosintética (T1 y T2). La respuesta a la calidad del espectro de luz de la productividad fue variable para los diferentes tratamientos, lo que sugiere un efecto específico.

Abstract

The project here presented originates from the necessity for reducing the cost of growing in regions of the world where sunlight is scarce, furthermore we are looking to increase the quantity of product per plant. In order to achieve the aforementioned goals a system capable of controlling the intensity and wavelength that reaches the plant has been developed. With the assistance of a microcontroller developed in a Linux environment, a Python code has been implemented which governs over the intensity and wavelength that reaches the plant, in addition of controlling the acquisition, storage, and recording of the data as well as the remote control of the system. The experiment was done with lettuce plants and it took place over a period of 20 days after being planted. The LED treatments consisted of three types of lightbulbs, the first one T3 made up of SMD 505 LED chips and two other LEDs specially designed for the horticulture that maximize photosynthetic efficiency (T1 and T2). The output of the quality of the spectrum varied between the different treatments which suggests a specific effect on the plants.

Índice General

Agradecimientos	i
Resumen	iii
Abstract	¡Error! Marcador no definido.
Índice General	vii
Índice Figuras	ix
Índice Tablas	xiv
Acrónimos y abreviaturas	xiii
Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Estructura del documento	1
1.2 Introducción a los sistemas de iluminación en los cultivos	2
1.2.1 Antecedentes	8
1.2.2 Iluminación en la actualidad	9
1.2.3 Funcionamiento	11
Capítulo 2. Objetivos y Planificación	15
2.1 Objetivos.....	15
2.1.1 Objetivos específicos	15
2.2 Fases del desarrollo	16
Capítulo 3. Material y Métodos	19
3.1 Sistema de iluminación	19
3.2 Dispositivo de control	22
3.3 Periféricos utilizados	25
3.4 Método de diseño.....	33
3.5 Obtención de datos	35
3.6 Métodos estadísticos de tratamiento de los datos	41

Capítulo 4. Diseño	43
4.1 Hardware.....	43
4.2 Software	47
Capítulo 5. Resultados.....	53
5.1 Medidas de pH y conductividad eléctrica.....	54
5.2 Datos obtenidos tras el experimento	59
5.3 Temperatura y humedad en la cámara.....	60
5.4 Potencia consumida por los sistemas	62
5.5 Espectro utilizado	64
Capítulo 6. Conclusiones	67
6.1 Conclusión	67
6.2 Trabajo futuro	69
Bibliografía	71

Índice Figuras

Figura 1: Horas de luz en el mundo (Prieto, 2019).	3
Figura 2: Horas de luz Europa (Prieto, 2019).	4
Figura 3: Lámpara de alta presión de sodio (Staff, 2019).	4
Figura 4: Lámpara fluorescente (Staff, 2019).	5
Figura 5: Iluminaria LED (Staff, 2019).	6
Figura 6: Efecto de la luz en las plantas (Berkovich et al., 2017).	7
Figura 7: Cámara de asimilación (McCree, 1972).	8
Figura 8: Evolución del precio de la tecnología LED (Evolución precio LED, 2019).	10
Figura 9: Vertical farming (Agritecture, 2019).	11
Figura 10: Unión P-N Silicio.	12
Figura 11: Avance de la tecnología LED (Gupta, & Dutta, 2017).	13
Figura 12: Circuito de autoajuste de intensidad (Winder, 2016).	14
Figura 13: Espectro irradiado por el tratamiento T1 (L18 NS1).	20
Figura 14: Espectro irradiado por el tratamiento T2 (L18 AP67).	21
Figura 15: Espectro irradiado por nuestro prototipo tratamiento T3 (SMD 5050).	21
Figura 16: Foto del microcontrolador Arduino Mega (Arduino Mega, 2019).	23
Figura 17: Microcontrolador BeagleBone Black Wireless (Barrett & Kridner, 2013).	24
Figura 18: Microcontrolador Raspberry Pi 3 modelo B+ (RaspberryPi.org, 2019).	25
Figura 19: Fuente de alimentación 5V DC (LEDrgb.es, 2019).	26
Figura 20: Fuente de alimentación 24V DC IP67 (LEDrgb.es, 2019).	26
Figura 21: Modulo de cámara para Raspberry Pi (BricoGeek, 2019).	27
Figura 22: Sensor de temperatura DHT22 (Max Electrónica, 2019).	28
Figura 23: Relé de 4 canales (Elegoo, 2019).	30
Figura 24: Esquemático de la placa de control.	30

Figura 25: Vista de la PCB insolada a una cara.	31
Figura 26: Cantidad de agua drenada.	31
Figura 27: Maceta de 0.4 L para las lechugas.	36
Figura 28: Lechuga “Romana” (Lactuca Sativa).	36
Figura 29: Lechuga trasplantada.	37
Figura 30: Hojas extendidas para una mejor medición.	38
Figura 31: Umbral de verdes.	39
Figura 32: Últimos umbrales aplicados.	39
Figura 33: Hojas seleccionadas para su cálculo de área.	39
Figura 34: Ajuste de umbrales.	40
Figura 35: Pines de salidas entradas Raspberry Pi (Arateo, 2017).	44
Figura 36: Esquema de conexiones del prototipo.	44
Figura 37: Organización de los componentes en la caja.	45
Figura 38: Caja estanca IP55.	45
Figura 39: Ventilador de refrigeración.	46
Figura 40: Sensor de temperatura y humedad.	46
Figura 41: Salida hacia la tira RGB y salida de cámara.	46
Figura 42: Programa principal.	48
Figura 43: Diagrama de flujo encendido de luces.	49
Figura 44: Diagrama de flujo recogida de datos temperatura y humedad.	50
Figura 45: Diagrama de flujo de la aproximación del área foliar.	51
Figura 46: Vista interior de la cámara de crecimiento Universidad de Almería. a: tratamiento T2 (L18 AP67), b: tratamiento T1 (L18 NS1) y b: tratamiento T3 (SMD 5050).	53
Figura 47: Comparación pH entrada y salida del tratamiento T1 (L18 NS1).	54
Figura 48: Conductividad eléctrica entrada y salida del tratamiento T1(L18 NS1).	54
Figura 49: Volumen retención de la planta para el tratamiento T1 (L18 NS1).	55
Figura 50: pH entrada y salida para el tratamiento T2(L18 AP67).	55
Figura 51: Conductividad eléctrica entrada y salida tratamiento T2 (L18 AP67).	56
Figura 52: Volumen de retención para las plantas del tratamiento T2 (L18 AP67).	56
Figura 53: pH entrada y salida para el tratamiento T3 (SMD 5050).	57

Figura 54: Conductividad eléctrica de entrada y salida para el tratamiento T3 (SMD5050).-----	57
Figura 55: Volumen retención de las plantas para el tratamiento T3 (SMD 5050). ----	58
Figura 56: Temperatura media en la cámara y en el exterior.-----	61
Figura 57: Humedad relativa media en la cámara y en el exterior. -----	62
Figura 58: Espectro de luz aplicado por el prototipo. -----	65

Índice Tablas

Tabla 1: Prestaciones de los distintos tipos de iluminación. X No disponible, ✓ Disponible ("HID vs CFL vs LED", 2019).	6
Tabla 2: Efectos de la longitud de onda en las plantas.....	7
Tabla 3: Distribución temporal de las tareas del TFG.....	17
Tabla 4: Características lumínicas de las tres iluminarias utilizadas en el experimento.	22
Tabla 5: Comparativa de los distintos microcontroladores.	25
Tabla 6: Valores medios de pH, CE en entrada y salida y volumen de retención en las plantas respecto a cada tratamiento.....	58
Tabla 7: Promedio y desviación peso fresco y peso seco para los tres tratamientos usados.....	59
Tabla 8: Promedio de longitud de tallo y raíz, diámetro de tallo, grosor de hoja y volumen de raíz de los tres tratamientos usados.	59
Tabla 9: Prueba de múltiples rangos al 95 % LSD (Warrenton, 2018).	60
Tabla 10: Promedio del área foliar para los tres tratamientos de luz.	60
Tabla 11: Coste energético de las iluminarias de cada tratamiento.	63
Tabla 12: Rendimiento económico de las iluminarias usadas en cada tratamiento. .	64
Tabla 13: Rendimiento lumínico de las tres luminarias utilizadas en los tres tratamientos.	64

Acrónimos y abreviaturas

ADC	Conversor Analógico Digital (Analog-to-Digital Converter)
CE	Conductividad Eléctrica
GPIO	Entrada/Salida de Propósito General (General Purpose Input /output).
I2C	Protocolo Inter integrado (Inter-integrated software)
NASA	Administración nacional de la aeronáutica y del espacio
NTC	Coeficiente de temperatura negativo (Negative Temperature Coefficient)
PAR	Radiación fotosintéticamente activa (Photosynthetic active radiation)
PAR	Radiación Fotosintéticamente Activa
PCB	Placa de circuito impreso (Printed Circuit Board)
pH	Potencial de hidrógeno (Potential Hydrogen)

PID	Proporcional Integral Derivativo
PPF	Flujo de fotones fotosintético (Photosynthetic Photon flux)
PTC	Coefficiente de temperatura positivo (Positive Temperature Coefficient)
PWM	Modulación por Ancho de Pulso (Pulse-Width Modulation)
RAM	Memoria de acceso aleatorio (Random Access Memory)
SPI	Interfaz serie periférica (Serial Peripheral Interface)
UART	Recepción-transmisión asíncrona universal (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter)
VNC	Computación virtual en red (Virtual Network Computing)

Capítulo 1. Introducción

Se ofrece a continuación una breve descripción del proyecto, así como un resumen de cada capítulo. Se da una descripción global desde la importancia de la iluminación en los cultivos, hasta los sistemas más modernos de iluminación en invernaderos.

1.1 Estructura del documento

El Trabajo Fin de Grado (TFG) se ha distribuido en 6 capítulos con la siguiente estructura:

- **Capítulo 1. Introducción.** En este capítulo ofrecemos una breve descripción del proyecto, así como un resumen de cada capítulo
- **Capítulo 2. Objetivos y planificación.** Describe los objetivos del trabajo, así como ofrece una visión del tiempo invertido en el Trabajo fin de Grado.
- **Capítulo 3. Materiales y Métodos.** De exponen los materiales empleados para la implementación del trabajo y métodos utilizados para el diseño y validación de los experimentos llevados a cabo para verificar el buen funcionamiento del proyecto.
- **Capítulo 4. Diseño.** Se describe el diseño, desarrollo e implementación del sistema.

- **Capítulo 5. Resultados.** Presentación de los resultados con los datos de los experimentos realizados.
- **Capítulo 6. Conclusiones.** En este capítulo presentan las conclusiones obtenidas y los futuros trabajos.

1.2 Introducción a los sistemas de iluminación en los cultivos

Desde los primeros asentamientos de humanos el cultivo ha sido quizás el factor más importante para el desarrollo de la humanidad, modificando su forma de vida pasando de ser nómadas para formar asentamientos alrededor de los cultivos. Con el incremento de la población en los últimos años, el aumento de la esperanza de vida debido a las mejoras tecnológicas en medicina, la demanda de productos hortícolas ha sufrido un gran auge y se requiere mejores sistemas de producción para alimentar a toda la población. A esta gran demanda se le suma que cada vez se dispone de menos espacio para el cultivo, esto ha potenciado nuevas formas de cultivo para optimizar el proceso de cultivo y mejorar la calidad y la cantidad de la producción.

De todas las variables que influyen en el crecimiento de las plantas, la iluminación es quizás el factor más importante para considerar en lo que se refiere al rendimiento de los cultivos. A través de los rayos de sol las plantas crean la materia orgánica necesaria para su correcto desarrollo mediante el proceso de la fotosíntesis; siendo necesario suplir, sobre todo en zonas del mundo donde las horas de luz escasean, la cantidad de luz necesaria para un correcto desarrollo de la planta mediante la introducción de la luz artificial. La cantidad de luz que les llega a las plantas depende de gran medida en la geolocalización del emplazamiento donde se pretende cultivar, por lo que dependiendo de la zona del mundo donde este situado el cultivo las horas de luz variarían, haciendo que el cultivo de distintas hortalizas se vea afectado.

Como vemos en el mapa de la Figura 1 la mayor cantidad de luz de centra en la zona del ecuador llegando a alcanzar unas 3500-4000 horas de luz anuales.

Si nos centrándonos en Europa, se puede observar en la Figura 2 que la mayor parte de luz al año les llega a las zonas de Europa del sur. Se han creado grandes zonas de cultivo hortícola en las zonas de mayor concentración horas con luz diaria, ya que naturalmente están provistas de una iluminación constante la mayor parte del año.

Ante esta situación el cultivo en la zona del norte se ve drásticamente reducido, al no poder optar a cultivar tanta variedad de hortalizas, para suplir esta falta de iluminación se recurre a la iluminación artificial. Las primeras luces utilizadas para suplir esta falta intentaban imitar a la luz solar, pretendían emular el espectro de luz que irradia el Sol. Las primeras luminarias eran lámparas de alta presión de sodio (HPS, High Pressure Sodium) que emitían en un espectro de 550-760 nm (amarillo, rojo), también se utilizaban luces fluorescentes que abarcaban una parte más baja del espectro alrededor de los 460 nm (azul) (Bures et al., 2018). Con las nuevas mejoras tecnológicas se están implementando sistemas basados en la tecnología LED (Light Emitting Diodes), este nuevo sistema nos hace posible alterar el espectro de la luz que emite el LED, así como un consumo energético bastante menor al de las otras dos lámparas citadas anteriormente. Las características de estas luminarias se describen a continuación:

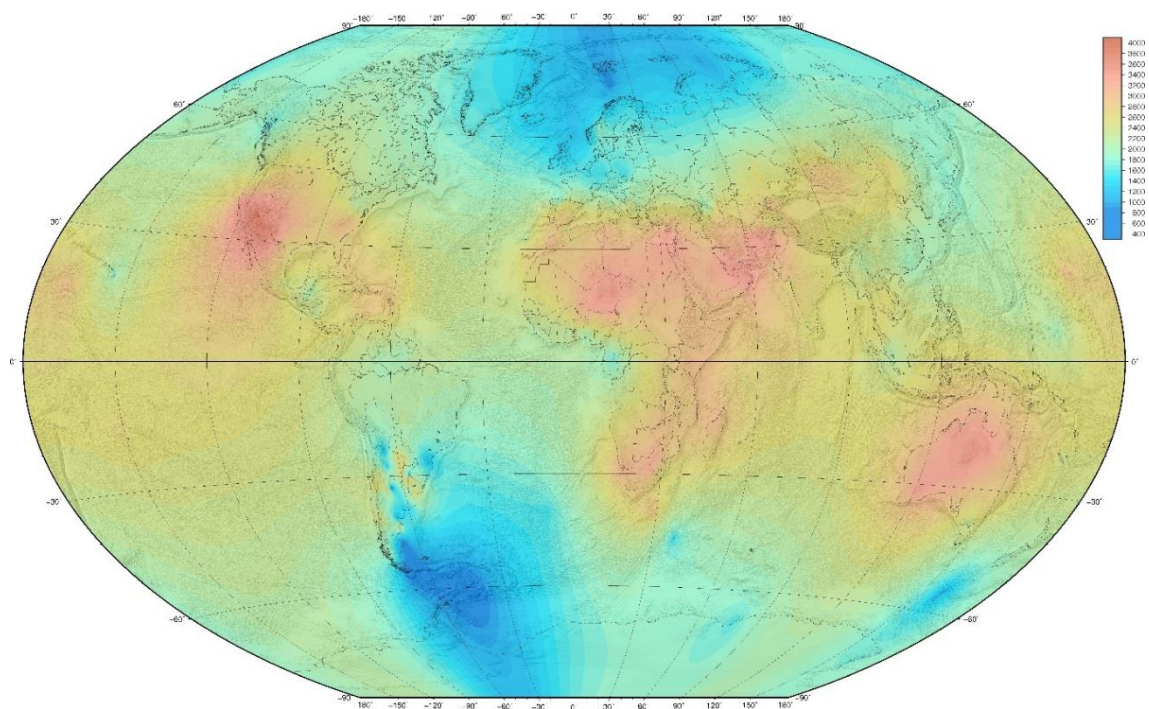


Figura 1: Horas de luz en el mundo (Prieto, 2019).

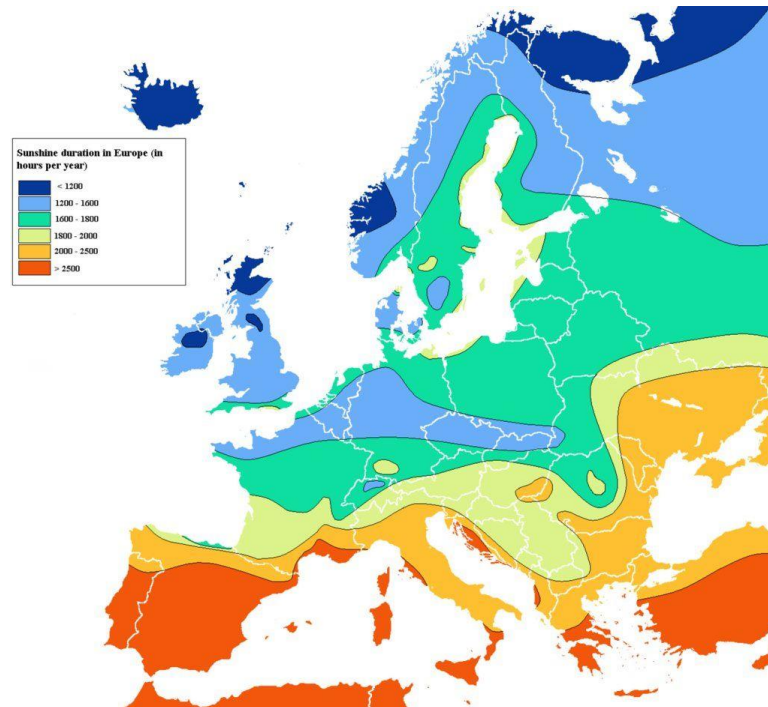


Figura 2: Horas de luz Europa (Prieto,2019).

- High Preassure Sodium HPS (Figura 3): este tipo de lámparas se empezaron a usar en instalaciones industriales alrededor de 1930 (Staff, 2019), debido a que son capaces de iluminar grandes zonas. Están compuestas por un gas de sodio a alta presión como su propio nombre indica, además suelen llevar mercurio y emiten una luz amarillenta. Son unas luces eficientes, aunque necesitan un tiempo de calentamiento para empezar a funcionar, a esto se le suma que están compuestas por materiales tóxicos para el consumo humano, por lo que en caso de rotura se podría contaminar la plantación de mercurio.



Figura 3: Lámpara de alta presión de sodio (Staff, 2019).

Sistema de control del crecimiento del cultivo mediante iluminación LED

- Fluorescentes (Figura 4): son lámparas de descarga en vapor de mercurio, iluminan en el espectro ultravioleta y azul. Estas lámparas tienen pequeño alcance, sólo pueden iluminar correctamente a distancias de entre 8-10 pulgadas desde el foco, de unos 20.32 cm a 25.4 cm. Esta característica limita su uso en el cultivo sea solamente para cámaras de crecimiento o para plantas que no alcancen gran altura. Al igual que las lámparas HPS dentro del tubo se encuentran materiales tóxicos como el mercurio, por lo que una rotura de dicha lámpara podría causar que se contamine todo un cultivo.



Figura 4: Lámpara fluorescente (Staff, 2019).

- LED (Figura 5): La tecnología LED se empezó a desarrollar en los años 80 (McCree, 1972), estos primeros sistemas eran demasiados caros por lo que se usaban solamente en investigación. Con las mejoras en los sistemas de producción poco a poco se fueron comercializando a precios más baratos. La gran ventaja que aportan este tipo de sistemas para el cultivo es que son capaces de alterar el espectro que emiten, es decir pueden emitir en longitudes de onda desde los 430-680 nm abarcando todo el espectro visible. A esto se le suma que tienen muy poco consumo y además no están provistos de materiales tóxicos.

En la Tabla 1 se presenta un resumen de las características de los tres sistemas de iluminación descritos.



Figura 5: Iluminaria LED (Staff, 2019).

Comparación Luces Características	HPS	Fluorescente	LED
Bajo Consumo	×	×	✓
Espectro Completo	×	×	✓
Largas horas de funcionamiento	×	×	✓
Contaminación	✓	✓	×
Bajo Calentamiento	×	✓	✓

Tabla 1: Prestaciones de los distintos tipos de iluminación. X No disponible, ✓ Disponible ("HID vs CFL vs LED", 2019).

No todo el espectro de luz es beneficioso, y solo parte de la radiación recibida se utiliza para realizar el proceso de fotosíntesis y los procesos morfogénicos. La fotosíntesis es la transformación de energía en forma de radiación a energía química, de toda la radiación que recibe la planta solo una porción de esta es la que realmente se utiliza que se conoce como PAR (Photosynthetic Active Radiation). Las radiaciones realmente influyentes para la planta son:

- 620-700 nm: Absorción de la clorofila.
- 510-620 nm: Poca actividad fotosintética.
- 380-510 nm: Zona de fuerte absorción de la clorofila.
- Menor de 380 nm: Se encuentra la luz ultravioleta con efectos germicidas.

Cuanto mayor sea el área foliar más radiación es capaz de captar la planta por lo que aumenta la producción hasta un valor máximo que depende del tipo de cultivo (Berkovich et al., 2017). Además de ayudar en el proceso de fotosíntesis la radiación también es la responsable del crecimiento de la planta, en general el tallo tiende a crecer hacia el foco de luz, en cambio la raíz tiende a alejarse del foco. En la Figura 6 quedan resumidos todos los efectos que tiene la luz en las plantas.

Sistema de control del crecimiento del cultivo mediante iluminación LED

Con todo lo expuesto anteriormente podemos decir que en el crecimiento de la planta las longitudes de onda que más afectan son las correspondientes al color azul y rojo es decir desde los 400-460 nm y de 600-640 nm.

Efectos en las plantas

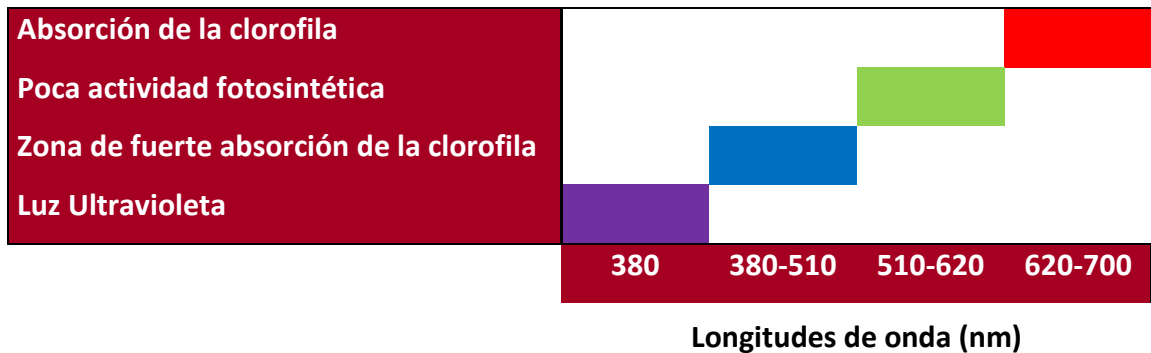


Tabla 2: Efectos de la longitud de onda en las plantas.

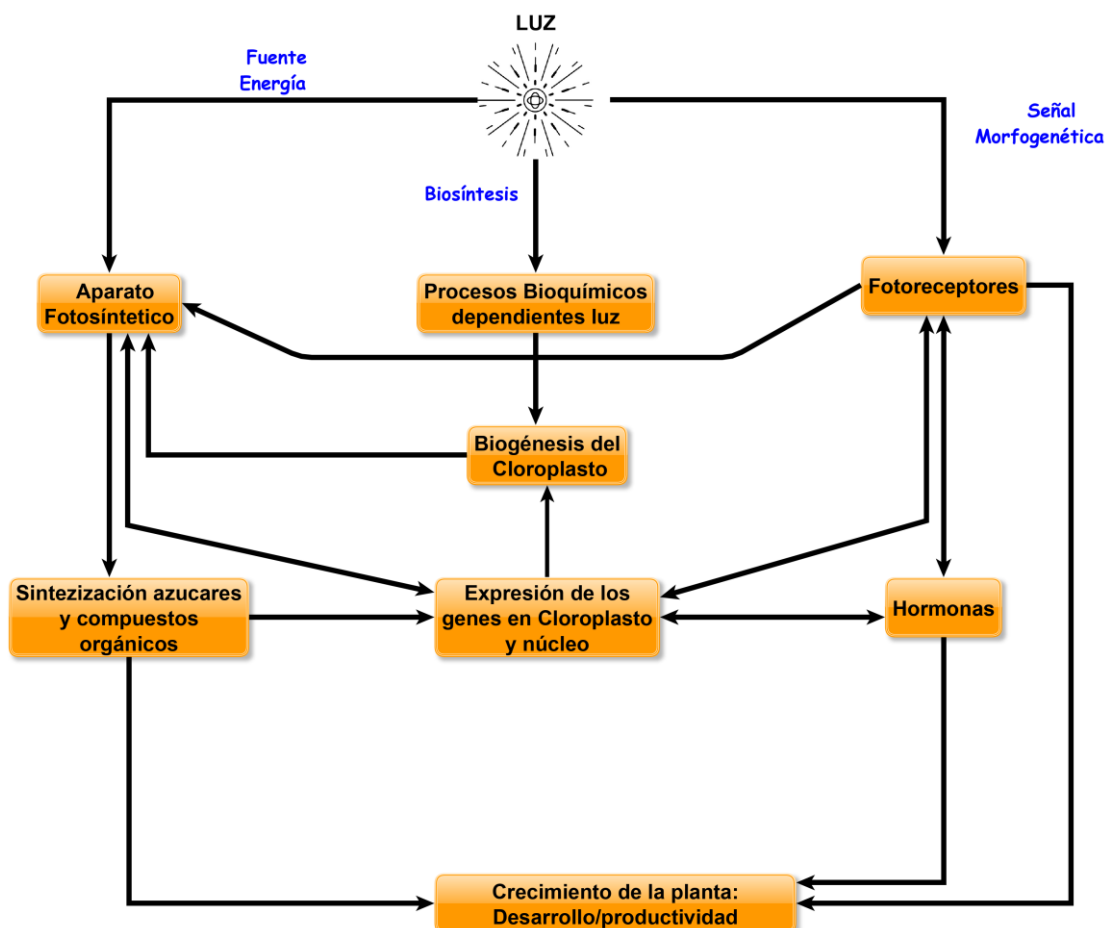


Figura 6: Efecto de la luz en las plantas (Berkovich et al., 2017).

1.2.1 Antecedentes

Aunque los primeros LEDs se desarrollaron en los años 80; McCree (1972) ya había probado la influencia de los espectros de luz que llegan a las plantas y cómo afectan a la fotosíntesis de estas. McCree tuvo en cuenta tanto la intensidad como el PPF (Photosynthetic Photon Flux), que estima la radiación fotosintética activa que emite una luz, y determinó el espectro más propicio para el crecimiento de las plantas. Para ello McCree creó una cámara de pruebas para experimentar en 22 tipos distintos de plantas y con distintos espectros al objeto de poder estudiar la respuesta de la planta ante estos estímulos lumínicos (Figura 7).

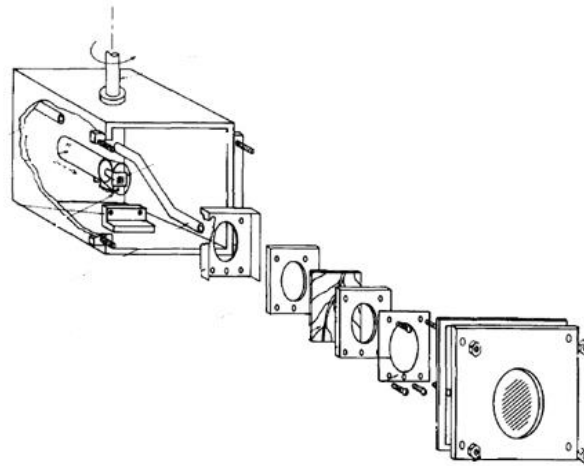


Figura 7: Cámara de asimilación (McCree, 1972).

Con los estudios que realizó McCree se demostró que las longitudes de onda que afectan al crecimiento de las plantas equivalen a los espectros de luz visible que van desde los 380 nm hasta los 780 nm, aunque diversos estudios han demostrado que las más significativas son las longitudes comprendidas entre los 400 nm y 700 nm (Urrestarazu, 2016). Es necesario saber que estas longitudes de onda varían su importancia en función del cultivo por ejemplo para una plantación de lechuga (*Lactuca Sativa*) necesita unas longitudes de onda desde 480 nm a 600 nm (Johkan et al., 2012), pero en contraste la mostaza (*Brasica juncea*) necesita longitudes de onda de 460 nm a 660 nm (Olle y Viršile, 2013).

Los primeros LEDs se utilizaron mayormente en investigación debido a un alto coste inicial, además de que estos LEDs carecían de un espectro completo por lo que su uso

iba acompañado de fluorescentes. La mayor parte de la investigación respecto a este tipo de iluminación se llevó a cabo por investigadores adjuntos a la NASA con la intención de implementar estos sistemas de iluminación para generar cultivos en la luna o marte (Bula et al., 1991).

Estos LEDs eran únicamente de color rojo (600 nm) y solo se podrían usar en pequeñas superficies de como mucho 1 m² por lo que no eran muy prácticos. Con la investigación en los últimos años se ha conseguido mejorar el espectro y la intensidad de la luz gracias a la utilización de iluminación en estado sólido (Morrow, 2008).

Gracias a los datos obtenidos por los investigadores se empezó a utilizar la iluminación artificial en los cultivos, pero fue de forma bastante progresiva. Con la introducción de lámparas fluorescentes o de alta presión de sodio en concreto en cultivos in vitro (Urrestarazu, 2016), pero quedó demostrado que la iluminación LED ofrecía mejores resultados, ya que con ellos se podía obtener las longitudes de onda específicas para cada cultivo. Además, ese estudio demostró que presentaban unas mejores prestaciones técnicas en términos de consumo, durabilidad, poco calentamiento...etc.

1.2.2 Iluminación en la actualidad

Históricamente, el uso de iluminación artificial era exclusivo para cultivos en zonas donde la luz escaseaba durante los periodos de invierno. Esta iluminación artificial se realizaba mediante luces de alta presión de sodio (HPS) o fluorescentes, con la restricción de que estas luces no abarcan el espectro completo de radiación necesaria para la planta (Urrestarazu, 2018), además de que tenían un consumo de electricidad excesivo. Con la introducción de los LEDs se obtiene un descenso considerable en los gastos de iluminación (menor consumo a igualdad de lúmenes) que combinado con la capacidad de ajustar el espectro de radiación que emiten los LEDs lleva a conseguir una mayor producción.

La iluminación LED puede tener distintas aplicaciones, este tipo de iluminación están especialmente adecuados al cultivo en vertical ya que emiten poco calor. También tienen aplicación en invernaderos como suplemento de luz, aunque esta aplicación

todavía se está desarrollando. La capacidad de alterar el espectro e intensidad hacen que este tipo de iluminación sean muy interesantes para el cultivo de plantas (Morrow, 2008). Además, hay que tener en cuenta el bajo consumo de este tipo de dispositivo, así como una alta eficiencia.

Aunque a priori parece que la utilización de sistemas LED son todo ventajas también cuenta con inconvenientes, uno de los más importantes es el coste del sistema que actualmente es bastante alto, pero se prevé que el coste vaya disminuyendo con el avance de las nuevas tecnologías. Del mismo modo se sabe que el precio del LED disminuye un factor de 10 cada década y de la misma manera su rendimiento mejora en un factor de 20 por década (Morrow, 2008).

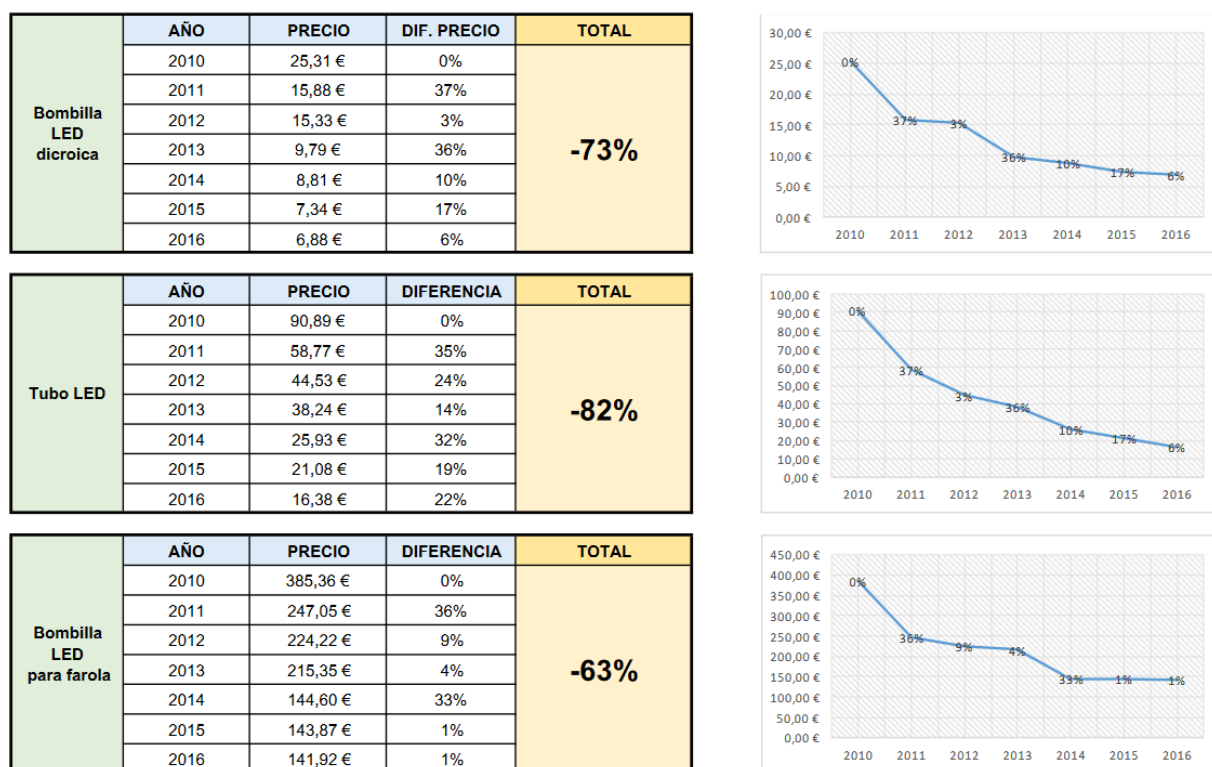


Figura 8: Evolución del precio de la tecnología LED (Evolución precio LED, 2019).

Gracias a estas características la iluminación LED cuenta con muchísimas aplicaciones dentro de la horticultura como por ejemplo producción de injertos, obtención de semillas, vertical farming (ver Figura 9), producción de plantas aromáticas, forraje verde hidropónico, cannabis...etc. (Urrestarazu y Bures, 2018).



Figura 9: Vertical farming (Agritecture, 2019).

1.2.3 Funcionamiento

El funcionamiento básico del LED consiste en convertir la energía eléctrica a luz, esto se lleva a cabo gracias a una estructura de unión P-N(diodo). Normalmente en un diodo la corriente pasa del lado p al n, pero si en este proceso se encuentra un agujero pasa a una zona de menor energía y desprende un fotón de luz, este es el principio de funcionamiento de los LEDs. Además, la longitud de onda que desprende el LED depende de los materiales que forman la unión P-N (Liu y Luo, 2011).

Un semiconductor como su propio nombre indica tiene las características de ambos un conductor y un aislante, los más usados son el silicio y el germanio que trabajan a una temperatura que ronda desde los 80 °C para el germanio y 160 C para el silicio. Son los más utilizados, ya que los dos cuentan con 4 electrones en su última capa al igual que el carbono y además poseen una estructura igual que la del diamante.

Un diodo semiconductor se obtiene gracias a una unión P-N, que como su propio nombre indica está formada por un material de tipo P y otro de tipo N. Esta unión hace que los electrones se vean atraídos a los huecos libres, por lo que los electrones cruzan la unión para llenar los huecos del otro material (Bailey, 1972). Aun sin la existencia de

carga exterior los portadores se desplazan debido a la influencia del cristal, ya que estos movimientos son erráticos la velocidad media de todos los portadores es cero. También hay que resaltar que los semiconductores dependen en gran medida de la temperatura, esto quiere decir que con un aumento de temperatura también existe un aumento de conductividad. De igual manera con una disminución de temperatura disminuye la conductividad (Llenares Galiana y Page del Pozo, 1997).

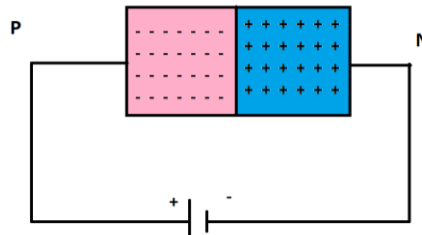


Figura 10: Unión P-N Silicio.

Teniendo esto en cuenta y dependiendo del material con el que se forme esta unión tendremos fotones con distintos niveles de energía y, por tanto, unas longitudes de onda distintas.

El principio de funcionamiento de los LEDs está basado en las propiedades luminiscentes de algunos semiconductores, que se define con el nombre de electroluminiscencia. Este fenómeno se observó por primera vez en el año 1910 por Oleg Lósev (Novikov, 2004), aunque no es muy conocido fue el primero en experimentar con los semiconductores y con los efectos de la electroluminiscencia. Aunque el fenómeno ya era conocido por el año 1920 no fue hasta 1961 cuando dos investigadores de Texas Instruments descubrieron que al pasar una corriente eléctrica por un semiconductor de Galio y Arsenio este emitía una radiación infrarroja. En ese mismo año Nick Holonyak Jr. Creó el primer LED de luz visible usando un semiconductor de Galio Arsenio y Fosforo que emitía una luz roja (Gupta y Dutta, 2017).

Conforme pasaron los años se fueron probando distintos compuestos para crear los LEDs hasta que llegamos a los de hoy en día, que tenemos una variedad de colores que abarca todo el espectro visible de colores como se muestra en la Figura 11.

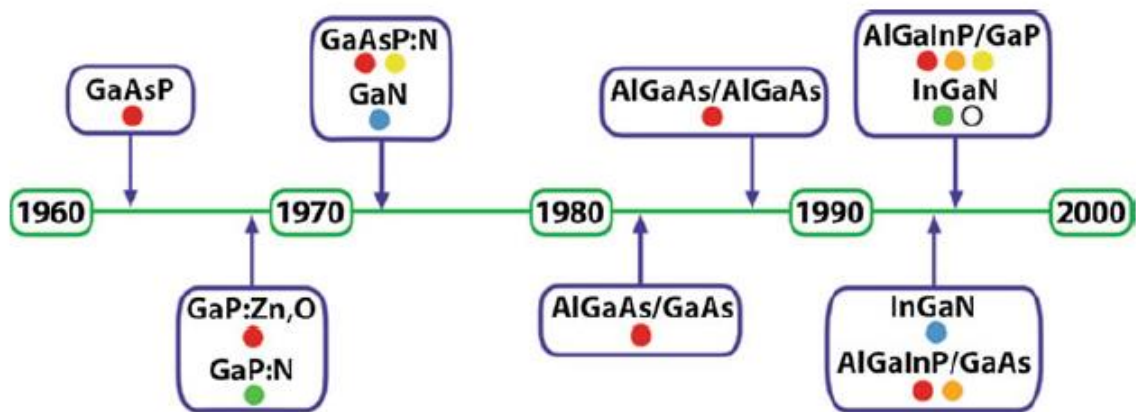


Figura 11: Avance de la tecnología LED (Gupta y Dutta, 2017).

La expansión de la iluminación LED se debe en gran medida a sus ventajas frente a las luces incandescentes o halógenas, principalmente desde el punto de vista ecológico, ya que tienen más eficiencia energética (85 % de menor consumo a igualdad de potencia además de mayor vida útil). Tiene baja emisión de calor lo que significa que las pérdidas energéticas por calor se ven reducidas, así como un mantenimiento mínimo. Para terminar, son más ecológicas no solo por el ahorro energético, sino que además no están compuestas de materiales nocivos para la salud como podrían ser las halógenas o incandescentes que están compuestas de mercurio.

En lo que respecta al control de este tipo de sistemas hay que tener en cuenta los distintos factores que influyen; por ejemplo, los LED se comportan como una carga a tensión constante muy parecido a como se comportaría un diodo Zener. Esto significa que el control se vuelve más complicado, ya que queremos controlar un sistema que trabaja a tensión constante y está alimentado por una fuente de tensión constante, por lo tanto, un ligero cambio en la fuente de alimentación o en la tensión en la carga causa un gran cambio en la corriente.

Teniendo estas condiciones en cuenta existen varias posibilidades para el control:

- Fuente de tensión:
 - Control pasivo de la intensidad: consiste en añadir una resistencia en serie de esta manera se puede calcular la variación de corriente en la carga con las siguientes ecuaciones (Ec. 1 y Ec. 2):

$$I_{min} = \frac{V_{Entmin} - V_{Cargamax}}{R_{ext}} \quad (1)$$

$$I_{max} = \frac{V_{Entmax} - V_{Cargamin}}{R_{ext}} \quad (2)$$

- Control activo de la intensidad: usa transistores de tipo MOSFET y realimentación para regular la corriente. El funcionamiento del MOSFET consta de 3 terminales puerta, fuente, y el drenaje (gate, source, drain) la conducción del drenaje-fuente se controla por la patilla puerta-fuente como cualquier MOSFET con la excepción de que la puerta está normalmente abierta.
- Fuente de corriente: como hemos mencionado anteriormente los LED se comportan como una carga por lo que se pueden conectar directamente a una fuente de corriente, y con la posibilidad de usar un espejo de corriente para limitarla.
 - Circuito de intensidad compartida autoajutable: si suponemos que la fuente de intensidad es constante la intensidad que se divide por las ramas será equitativa ya que tienen las mismas cargas. Esta manera nos asegura que si alguna de las ramas ya sea R (red), G (green) o B (blue) se rompen la intensidad seguirá dividida equitativamente entre las dos restantes como se muestra en la Figura 12.

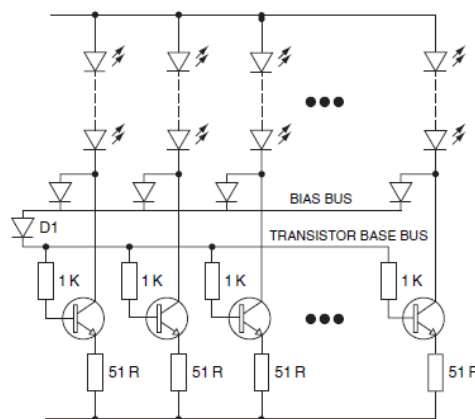


Figura 12: Circuito de autoajuste de intensidad (Winder, 2016).

Capítulo 2. Objetivos y Planificación

En este capítulo resumiremos los objetivos del proyecto y se adjuntará un cronograma para visualizar el desarrollo temporal del mismo.

2.1 Objetivos

En el presente trabajo se busca conseguir un sistema de iluminación capaz de competir con los LEDs comerciales que se usan para el cultivo de plantas. Además, este dispositivo ofrece la posibilidad de variar la longitud de onda de la luz que incide sobre las plantas siendo esta una nueva característica que no estaba presente en los LEDs anteriores. Teniendo lo anterior en cuenta se busca ofrecer un producto completo que sea capaz de mejorar el crecimiento de las plantas, así como ejercer un control de clima de un pequeño invernadero.

2.1.1 Objetivos específicos

En el TFG se quiere conseguir los siguientes objetivos específicos:

- Diseñar un sistema de iluminación LED para cultivos que compitan en funcionalidad con los sistemas comerciales desarrollados para tal fin.

- Evaluar el sistema mediante una prueba de cultivo de lechuga, con la finalidad de comparar el crecimiento en con tres iluminaciones: luz neutra, luz LED específica comercial e iluminación LED diseñada.
- Evaluar el consumo de potencia en el experimento.
- Obtener el diagrama tridimensional del control de rango de longitud de onda/intensidad de longitud de onda/tiempo de exposición aplicado al cultivo.

2.2 Fases del desarrollo

1. **Investigación previa.** Con anterioridad a realizar el proyecto es necesario realizar una investigación sobre los sistemas actuales de iluminación en los invernaderos, así como la viabilidad del proyecto.
2. **Selección y compra del material.** Se estudia las diferentes opciones comerciales y los materiales necesarios para la implementación física del sistema de iluminación. Una vez seleccionados se obtienen los materiales necesarios: sistema basado en microcontrolador embebido, fuente de alimentación, tira LED, sensor de temperatura y humedad, Camera para control inalámbrico del proceso, etc...
3. **Desarrollo y diseño del prototipo (Hardware).** Se diseña un prototipo inicial donde el controlador, la fuente de alimentación y el relé se encuentran en el interior de una caja con su cableado pertinente. En la exterior queda la tira LED, la cámara y el sensor de temperatura y humedad que medirá las condiciones de la habitación para establecer un control exhaustivo del crecimiento de las plantas objeto de estudio.
4. **Sistema de control en tiempo real.** Los datos se almacenan de manera local, pero accesibles online mediante una conexión remota.
5. **Datos obtenidos.** Se realizarán dos experimentos en un periodo de dos meses y un distanciamiento de 1 mes. Con ello se pretende corregir los errores de los rangos/intensidad de las longitudes de onda según el objetivo de

Sistema de control del crecimiento del cultivo mediante iluminación LED

crecimiento/producción que se pretende alcanzar. Los experimentos se realizan con dos tipos de iluminación, una con iluminaría comercial tipo LED específica, otra iluminación LED neutra y otra mediante el prototipo propuesto donde se puede modificar online el rango/intensidad de la longitud de onda aplicada.

6. **Producto final.** Se pretende obtener un prototipo de iluminación LED para una determinada planta, es decir obtener el diagrama tridimensional del control de rango de longitud de onda/intensidad de longitud de onda/tiempo de exposición aplicado al cultivo. Para otro cultivo se debe ensayar y obtener el nuevo diagrama tridimensional personalizado. Cada diagrama tridimensional caracteriza a un determinado cultivo.

En la Tabla 3 se presenta una planificación de las tareas enumeradas en el apartado anterior y distribuido por quincenas.

Mes	Julio		Agosto		Sept.		Oct.		Nov.		Dic.		Ene.		Feb.		Mar.		Abril.		Mayo.	
Quincena	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª
Etapas																						
Investigación																						
Previa																						
Selección y compra del material																						
Diseño del Prototipo																						
Sistema de Control																						
Datos obtenidos																						
Producto final																						

Tabla 3: Distribución temporal de las tareas del TFG.

Capítulo 3. Material y Métodos

En este apartado explicamos los componentes seleccionados para nuestro sistema, así como los cálculos y la selección de los materiales.

3.1 Sistema de iluminación

El espectro de luz que le llega a la planta determina en gran parte su crecimiento, por lo que es muy importante para su correcto desarrollo. Además de la iluminación también influyen la temperatura y humedad.

Para un crecimiento correcto de las plantas en la cámara se tiene que mantener a 25°C y una humedad relativa de un 60 % (Johkan et al., 2012). Según Cornillon para un mayor crecimiento la temperatura de las plantas debe estar entre 25-28°C. Además de que se observa una mejora en la absorción de minerales por parte de las plantas (Cornillon, 1987). El experimento se llevó a cabo en la Universidad de Almería (España), en una cámara de crecimiento controlado de (10 m x 2.5 m) entre 2018-2019. Para este experimento se utilizó una lechuga de tipo romano (*Lactuca sativa* cv. Romana).

Para la siembra inicial se usaron macetas de 0.40 L, llenas de fibra de coco, que contenían 1 planta cada una y representaban una repetición. Todas las plantas se fertilizaron con una solución nutritiva estándar recomendada por Sonneveld y Straver

(1994), a un pH de 5.80 y CE de 2.20 (dS/m). Las características físicas de la fibra de coco utilizada como sustrato siguen las indicaciones de (Urrestarazu, 1998).

Para el experimento se utilizaron lámparas L 18 NS1 Valoya® (Helsinki, Finlandia), L18 AP67 Valoya® (Helsinki, Finlandia), y una tira LED SMD 5050, estas dos primeras son lámparas LED con específico uso agronómico, como los espectros a evaluar y respectivamente (T1), (T2) y (T3). Las especificaciones técnicas se muestran en la Tabla 4. Para la determinación de las características espectrales, se realizaron tres mediciones, a una distancia de 20 cm del panel en el que se alojaron los tubos de LED. Se usó un fotoradiómetro HD 2302.0 (Delta OHM®, Veneto, Italia) para medir la luz cuantitativa. Las sondas LP 471 PAR y LP 471 PHOT se utilizaron para medir la densidad del flujo fotónico ($\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$) y la iluminancia (lux), respectivamente. Los espectros de los tratamientos T1, T2 y T3 se presentan en las Figuras 13, 14, y 15 y se registraron con el espectrómetro UPRtek MK350S (Miaoli, Taiwán). El fotoperíodo fue de 16/8 h (día/noche) a una temperatura de 25°C y humedad relativa entre 60 y 70 %.

- **Tratamiento T1 (L 18 NS1 Valoya):** obtenemos los siguientes datos:

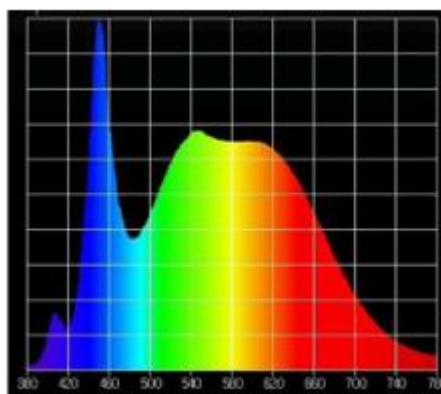


Figura 13: Espectro irradiado por el tratamiento T1 (L18 NS1).

En la Figura 13 se muestra la distribución del espectro que cambia de un tratamiento a otro, este espectro equivale al tubo LED L18 NS1. Se aprecia que el pico en este caso se centra en las altas longitudes de onda teniendo el pico máximo en 652 nm, también observamos que contiene un poco de verde en las longitudes de onda intermedias y, por último, un pico en 450 nm aproximadamente que equivale al color azul.

- **Tratamiento T2 (L18 AP67 Valoya):** como en el tratamiento anterior se observa que la mayor parte de la radiación proviene de las altas longitudes de onda. Se aprecia un pico en 621 nm, además de apenas tener verde solo se aprecia otro pequeño pico en 450 nm aproximadamente.

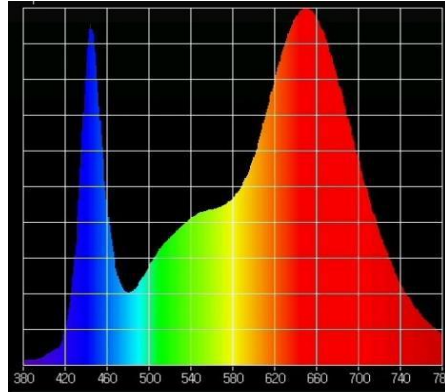


Figura 14: Espectro irradiado por el tratamiento T2 (L18 AP67).

- **Tratamiento T3 (SMD5050):** El espectro que se muestra en la Figura 15 corresponde al espectro que emite nuestro prototipo, como se puede apreciar está compuesto en mayor parte por azul teniendo un pico en 463 nm, también contiene luz verde con un pico en 520 nm aproximadamente y por último un pico de luz roja en 630 nm.

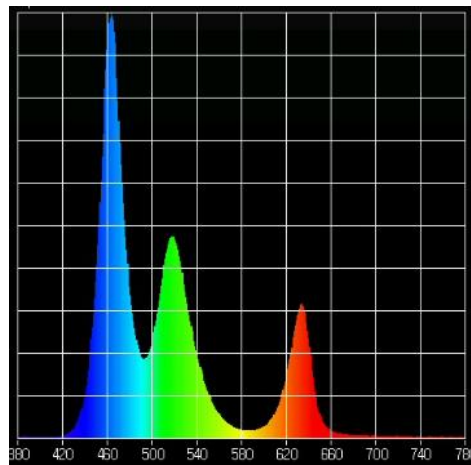


Figura 15: Espectro irradiado por nuestro prototipo tratamiento T3 (SMD 5050).

Tipo	Tipo de lámpara LED	PAR ($\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$)	Iluminancia (Lux)
T1	L 18 NS1 Valoya	29.32	1012.23
T2	L18 AP67 Valoya	35.60	1147.40
T3	Tira LED SMD 5050	34.69	1123.00

Tabla 4: Características lumínicas de las tres iluminarias utilizadas en el experimento.

Como se observa en la tabla se ha intentado que para este experimento tuvieran todos los tratamientos aproximadamente los mismos valores de luz PAR e iluminancia, de este modo veríamos la influencia de los distintos espectros en las plantas. Debido a que en los tratamientos T1 y T2 no se puede cambiar la intensidad ni el espectro, hubo que cambiar el posicionamiento de las luces para conseguir que los valores fuesen parecidos. En cambio, con nuestro prototipo cambiamos la intensidad y el espectro por software ajustándolo para hacerlo coincidir con los tratamientos anteriores.

3.2 Dispositivo de control

Se ha estudiado las diferentes opciones de controladores que hay en el mercado, con la finalidad de elegir el controlador que mejor se adapta a las necesidades del sistema. Las prestaciones que se busca son que sea un sistema con sistema operativo para manejo de datos, barato, con wifi integrado, programación fácil, con puertos de entrada y salida de tipo digital, así como un puerto con capacidad para generar pulsos de ancho modulados (PWM). Ante estas especificaciones aparecen 3 modelos en el mercado y los cuales son Raspberry Pi (Figura 18), Beagle Bone Black (Figura 17), y Arduino (Figura 16).

- Arduino Mega (Figura 16) este dispositivo lleva de por si entradas analógicas, PWM (Pulse-Width Modulation), pines con el protocolo UART y I2C y pines GPIO (General Purpose Input/Output) para poder conectar los sensores, además de un procesador bastante completo un AT mega 1280 de la marca ATMEL (Barrett y Pack 2012)). Este microcontrolador se programa en C++ a través de una interfaz, la cual se conecta al ordenador.

Existen muchos proyectos de sensores hechos con Arduino, ya que es una alternativa barata y eficaz y en donde se pueden implementar un controlador

PID (Proporcional Integral Derivativo) sin mucha dificultad (Pham, 2014). Aunque tiene muy buenas prestaciones no cuenta con WIFI, además de no tener un sistema operativo. Estas dos razones fueron las más influyentes para descartarlo como una opción viable de implementación del sistema propuesto.



Figura 16: Foto del microcontrolador Arduino Mega (Arduino Mega, 2019).

- Beaglebone Black (Figura 17) este microcontrolador es quizás el más potente de los tres considerados. Cuenta con puertos de entrada y salida 2x 46 pines, 2x I2C, 5x UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter), I2S, SPI (Serial Peripheral Interface), CAN, 66 x 3.3 V GPIO (General Purpose Input/Output), 7 x ADC (Analog-to-Digital Converter), además de un procesador de 512 MB AM335 x 1 GHz ARM® Cortex-A8 de Texas Instrument (Roberts-Hoffman y Hegde 2009). Incluso da la opción de usar distintos sistemas operativos como Ubuntu, Debian, Android y Cloud9 lo que facilita bastante el proceso de programación ofreciendo la oportunidad de usar el entorno que mejor se adapta al programador (Araiza et al., 2018). Aunque todas las opciones comentadas responden a las exigencias de la implementación del sistema propuesto, el precio básico de este controlador es de 56 € con el inconveniente que este modelo viene sin conexión WIFI; el modelo superior con WIFI BeagleBone Black Wireless tiene un precio de venta de 70 € por lo que no cumple la especificación de precio y se descarta.



Figura 17: Microcontrolador BeagleBone Black Wireless (Barrett y Kridner, 2013).

- Por último, el microcontrolador Raspberry Pi 3 modelo B+ (Figura 18) se considera este modelo al ser el último que ofrece la marca Raspberry en el mercado. En prestaciones hay que destacar que posee un procesador de 4 núcleos de 64 bit Broadcom BCM2837, 1 GB de memoria RAM DDR, integra una tarjeta inalámbrica Broadcom BCM43438 a 2.4 GHz, además de comunicación inalámbrica por Bluetooth 4.1. Para el almacenamiento cuenta con una microSD normalmente de 16 GB, pero se puede ampliar hasta 128 GB. En relación con el hardware incorpora puerto HDMI, 4 x USB 2.0, Ethernet y entrada serie de cámara. Cuenta con 40 pines de estos 2 x PWM (Pulse Width Modulation), 2 x 3.3V DC, 7 x GND (Tierra), 2 x 5V DC, y el resto son puertos GPIO (General Purpose Input Output). En términos de sistema operativo se puede usar con Debian, Raspbian, Linux e incluso Windows 10, lo que facilita la programación de este teniendo un gran abanico de opciones. Teniendo lo anterior en cuenta y con un precio básico de 36 €, este microcontrolador responde a todas las prestaciones necesarias y al coste y por consiguiente se elige para la implementación del sistema propuesto.



Figura 18: Microcontrolador Raspberry Pi 3 modelo B+ (RaspberryPi.org, 2019).

Como se observa en la Tabla 5 las prestaciones del microcontrolador BeagleBone Black y de la Raspberry Pi son muy parecidos, pero existe una gran diferencia de precio entre los dos modelos, por lo que finalmente nos decantamos por elegir el microcontrolador Raspberry Pi para nuestro sistema.

<i>Tabla comparativa</i>	<i>Arduino Mega</i>	<i>BeagleBone Black</i>	<i>Raspberry Pi 3B+</i>
Sistema operativo	Arduino	Ubuntu/Debian	Linux
Precio	50 €	56 €	36 €
Wifi	No	Si (Precio aumenta 76 €)	Si
Programación	C++	Python	Python
Digital I/O	Si	Si	Si
Analog I/O	Si	Si	Si
PWM	Si	Si	Si

Tabla 5: Comparativa de los distintos microcontroladores.

3.3 Periféricos utilizados

En este apartado se analizan los elementos externos al microcontrolador usados para la realización del prototipo:

- **Fuente de alimentación:** la primera tira LED usada se alimenta a 5V DC se requiere una fuente de alimentación externa, aunque el microcontrolador cuenta con salidas de 5V DC se optó por usar una fuente externa para de esta forma no forzar la Raspberry Pi y por problemas de requerimiento de potencia. De esta manera, se evita algún fallo o rotura del microcontrolador

por causas externas como podría ser una sobrecarga o tensiones parásitas, ver Figura 19.



Figura 19: Fuente de alimentación 5V DC (LEDrgb.es, 2019).

- Tira LED 24V DC para la segunda parte del proyecto se considera la utilización de una tira con más potencia que la que se estaba usando previamente, al cambiar de tira necesitamos usar una nueva fuente de alimentación de 24V DC y con una potencia de 100 W, ver Figura 20.



Figura 20: Fuente de alimentación 24V DC IP67 (LEDrgb.es, 2019).

- **Tira LED:** es la parte fundamental del sistema propuesto; para comenzar se buscó una tira que abarcase el máximo espectro posible, además se necesitaba una tira que se pudiese controlar mediante una señal de pulso modulada (pulse-width modulation, PWM) y que a la vez fuese eficiente. Con estas especificaciones encontramos las tiras WS2811 y WS2801 producidos por la empresa Worldsemi.
 - WS2801: es un controlador LED a corriente constante alimentado a 5V DC con 3 entradas una para alimentación, otra para tierra y la

última para entrada de datos. Tiene una temperatura de trabajo de -40 a 85°C y un espectro de longitudes de onda que va desde los 470-630 nm.

- WS2811: también controlado a corriente constante y alimentado a 5V DC consta de 3 entradas, pero tiene un espectro un poco mayor que el 2801 en este caso va desde los 460-640 nm y además cuenta con la ventaja de que tiene mayor luminosidad en comparación con la tira anterior
- Tira LED RGB: tira LED de 72.00 W, 14.40 W/m controlada mediante tres transistores MOSFET y alimentada a 24V DC. Incorpora el chip LED 5050 y IP66 además proporciona un flujo luminoso de 310 Lm/m.

Estos tres modelos serán los usados en los experimentos.

- **Cámara PiCamera:** esta cámara se va a usar como media de control y monitorización de la cámara de ensayos. Consta de una definición de 1080p30, está fabricada por Sony y equivale al modelo IMX219. También se va a utilizar para comparar el crecimiento de las plantas, ver Figura 21 (Patrón et al., 2013).



Figura 21: Modulo de cámara para Raspberry Pi (BricoGeek, 2019).

- **Sensor de temperatura y humedad DHT22:** Este sensor se alimenta a de 3.3 V a 5 V. Dispone de un tiempo de muestreo de 2 segundos, con una

temperatura de funcionamiento de -40°C a 80°C , además tiene una resolución decimal. Por otra parte, el sensor de humedad puede medir desde un 0% de humedad relativa hasta un 99.9 % tiene una precisión de $\pm 2\%$ de humedad relativa a 25°C . Además, cuenta con la ventaja de que la conexión al controlador es directa, no hace falta ningún dispositivo de adquisición y descargar una librería conseguimos tenerlo operativo, ver Figura 22.

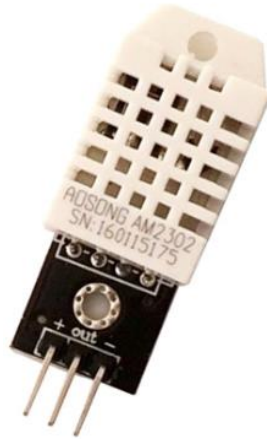


Figura 22: Sensor de temperatura DHT22 (Max Electrónica, 2019).

Para medir la temperatura este dispositivo está provisto de una NTC (Negative temperature coefficient), modelo DS18B20 y para la humedad cuenta con un sensor de humedad capacitivo compuesto por dos placas conductoras y un dieléctrico entre las dos.

- El funcionamiento de la NTC se basa en dispositivos conocidos como termistores o reóstatos, son resistencias que cambian con la temperatura. Todas las resistencias son termistores, ya que con la temperatura su impedancia se ve afectada pero estos cambios suelen ser muy bajos y bastante difíciles de medir. Los termistores son diseñados para que su resistencia varíe ostensiblemente con la temperatura, existen dos tipos de termistores los conocidos como PTC con coeficiente positivo y los NTC con coeficiente negativo. Estos dispositivos cuentan con las siguientes ventajas:
 - El precio de estos dispositivos es muy bajo.

- Su tamaño es muy pequeño.
- Tienen un tiempo de respuesta bastante rápido.

Los inconvenientes son:

- No lineales.
 - Requieren una fuente de corriente o de tensión.
 - Fragilidad.
- El funcionamiento del sensor de humedad se basa en un pequeño condensador formado por un material dieléctrico situado entre un par de electrodos. Suelen tener una constante dieléctrica de 2 a 15, cuando hay humedad en el lugar de medición está constante varía y así varia la capacitancia del condensador lo que nos proporciona la humedad relativa. Las ventajas de este dispositivo son:
- Precio bajo.
 - Pequeño tamaño.
 - Un tiempo de respuesta rápido aproximadamente 2 segundos.

Los inconvenientes son:

- No linealidad.
- Errores por temperatura.
- Errores de calibración.

Existen otros tipos de sensores de humedad como por ejemplo los sensores de humedad por ultrasonido, pero fueran descartados por tener un precio bastante alto.

- **Relé de 4 canales:** placa de 4 canales de salida con una tensión de trabajo de 5V, cuenta también con un optoacoplador para evitar interferencias y se puede usar con tensiones de hasta 250 V AC y 10 A. Con este dispositivo seremos capaces de controlar periféricos que trabajen a alta tensión como podrían ser calentadores o ventiladores dentro de la cámara de ensayo, ver Figura 23.



Figura 23: Relé de 4 canales (Elegoo, 2019).

- **Circuito de control mediante transistores:** Para realizar el control de la tira LED de 24 V se ha creado un circuito que consta de 3 transistores MOSFET uno por cada color a controlar como se muestra en el siguiente esquemático de la Figura 24 y 25.

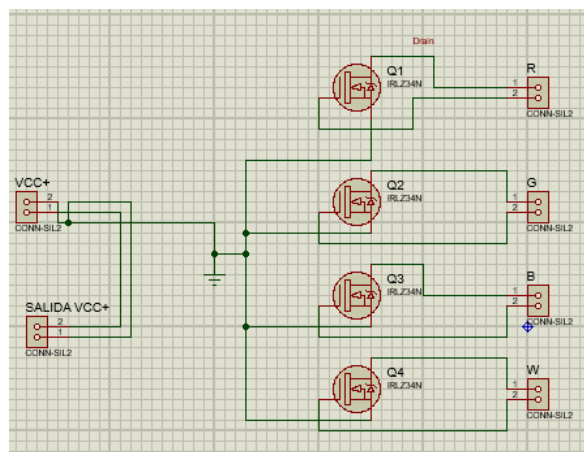


Figura 24: Esquemático de la placa de control.

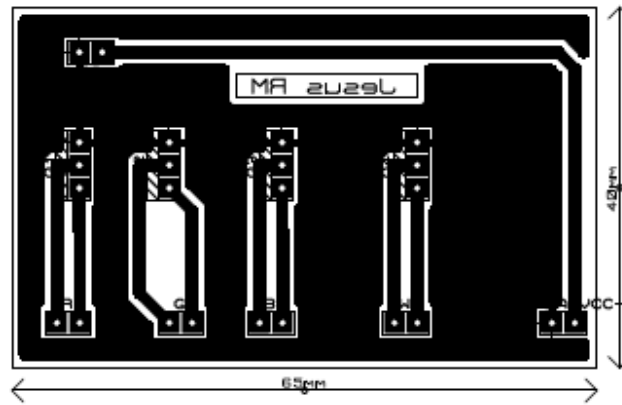


Figura 25: Vista de la PCB insolada a una cara.

El funcionamiento consiste en 3 transistores en modo descarga (Depletion mode-mosfet), la conducción se controla por la puerta del transistor con la única diferencia es que este tipo de transistores está siempre encendido, es decir, la tensión entra la puerta y la fuente es cero. Conforme la tensión va decreciendo con respecto a la fuente el dispositivo se apaga.

La cantidad de agua con la que se ha regado depende del estado de la planta por lo que no se ha regado siempre con la misma cantidad de agua. Para comenzar se seleccionaba una planta al azar de cada tratamiento, se regaba con 100 ml y esperamos unos 15-20 minutos para que la planta drenase toda el agua sobrante como vemos en la Figura 26.



Figura 26: Cantidad de agua drenada.

Una vez teníamos las cantidades de agua drenada por cada tratamiento, aplicamos una regla de 3 para saber la cantidad exacta con la que regaríamos el resto de las plantas,

teniendo en cuenta que deben drenar un 20 % del agua con la que se ha regado. Con esto obtenemos la siguiente regla de tres:

$$100 \text{ ml} \rightarrow 50 \%$$

$$X \text{ ml} \rightarrow 20 \%$$

La cifra del 50 % se ha puesto como ejemplo, ya que esta cifra variaba dependiendo del tratamiento, despejando la X de la ecuación anterior obtendremos la cantidad con la que regar el resto de las plantas.

Cada vez que se riegue tenemos que medir el pH y la conductividad eléctrica tanto del agua de riego como del agua que drena la planta. Para ello de todas las plantas seleccionamos 3 al azar por cada tratamiento, en total se medirán 9 drenajes.

Comenzamos regando 3 plantas con la cantidad de solución que hayamos calculado antes, para medir correctamente cogemos el tiempo al regarlas y esperamos entre 15-20 minutos, para que la planta termine de drenar. Una vez la planta ha drenado el agua sobrante se mide, si se ha calculado bien esta agua debería ser entre un 15-20 % de la cantidad con la que se regó. Una vez medido el volumen drenado se procede a medir el pH y la conductividad eléctrica del agua drenada de las tres plantas mediante un sensor de pH y CE, este proceso lo repetimos para los tres tratamientos con el fin de tener una mejor valoración sobre el estado en el que se encuentran las plantas.

Una vez han pasado los 20 días de crecimiento se procederá a el corte de las plantas, pero antes debemos medir la altura y el diámetro de la planta en la maceta, una vez hecho esto procedemos a quitar las hojas dejando en la maceta tan solo la raíz y el tallo.

Para separar las raíces de la tierra, primero quitamos la maceta que se pone encima de un colador y echamos agua para limpiar la tierra, una vez quitada toda la tierra procedemos a medir el peso fresco de la raíz y del tallo. Con el pie de rey medimos el diámetro del tallo este dato es de vital importancia para saber el estado de la planta, a mayor diámetro mejor es el estado de la planta.

Para medir el volumen de raíces, se coge la raíz una vez está limpia de toda la tierra y se introduce en un vaso milimetrado que tenga dentro un volumen previo de agua. Cuando se introduce la raíz este volumen de agua sube y así conseguimos el volumen de la raíz.

Por otro lado, se cuentan las hojas de cada planta, se mide el grosor de las hojas con la ayuda de un micrómetro y finalmente se mide el peso fresco de las hojas. Cuando tengamos todos los pesos frescos procedemos a medir el peso seco, para ello debemos secar tanto las hojas como la raíz y el tallo de cada planta. Se meten las hojas en el horno extendidas a 95 grados durante un día y se comprueba si están realmente secas o no y se pesan con una balanza de precisión, si no lo estuvieran se vuelven a meter en el horno durante otro día y se vuelven a pesar, si no hay diferencia en el peso con la medición realizada el día anterior esto indica que ya están totalmente secas, en caso contrario se volverían a introducir al horno durante un par de horas hasta que varié el peso entre mediciones. Para las raíces en seco se disponen de cuatro en cuatro y la medida final se divide entre cuatro.

Es de vital importancia que las hojas se coloquen en perpendicular dentro del horno de esta forma nos aseguramos de que se secan todas a la misma vez y evitamos que se quemen las hojas.

Para asegurar que la temperatura dentro de la cámara fuese lo más homogénea posible se activaba un ventilador de recirculación de aire, además de que las plantas necesitan alrededor de unas 35 renovaciones de aire al día si se encuentran en emplazamientos cerrados. Por estas razones se mantuvo un ventilador funcionando durante el día cada hora se encendía 30 min y por la noche de madrugada se encendía 2 veces en toda la noche durante otros 30 min.

3.4 Método de diseño

Para el diseño del prototipo teníamos ciertos requerimientos que cumplir a priori; como trabajar en un ambiente húmedo y con agua, lo que condiciona el uso de sistemas para protección frente al agua. Algunos de ellos no se fabrican con este tipo de protección, por lo que se considera albergar estos componentes en una caja estanca para evitar el

posible deterioro debido al agua y a la humedad de la cámara. Además, este tipo de sistemas utilizan mucha potencia eléctrica por lo que se calcula la potencia y se aplica un coeficiente de seguridad para posible ampliación si se ve necesario y para asegurar posibles fluctuaciones debido a las conexión-desconexión de las luces.

Se calcula la potencia consumida por los LEDs, por la Raspberry Pi, así como la potencia consumida por el ventilador y por el sensor de temperatura y humedad.

- Potencia consumida por las tiras LED:

La tira LED tiene un consumo de 14.40 W/m, teniendo en cuenta que la tira LED tiene una longitud de 5.00 m tenemos que:

$$14.40 \frac{W}{m} \times 5.00 m = 72.00 W$$

La fuente de 24V DC tiene una potencia máxima de 60 W por lo que una sola fuente no es suficiente para el sistema por ello se procede a cortar la tira LED en dos cachos, cada uno de 2.5 m obteniendo las siguientes potencias:

$$14.40 \frac{W}{m} \times 2.50 m = 36.00 W$$

Con esta nueva potencia nos cercioramos de que la fuente es capaz de funcionar correctamente, además de evitar sobrecalentamiento, ya que está funcionando a media carga aproximadamente. Con esto también obtenemos la posibilidad de incorporar nuevos periféricos (Ventilador 24V DC) a cada una de las fuentes y que no se sobrepase la potencia máxima.

- Potencia consumida por el microcontrolador Raspberry Pi:

Si la CPU está al 100 % de funcionamiento (en el peor de los casos) se obtiene un consumo de 3.60 W por hora por lo que:

$$3.60 W \times 16 h = 57.60 Wh$$

En el peor de los casos el microcontrolador consumirá 57.60 Wh, pero como sabemos de monitorizar el microcontrolador en las 16 horas de funcionamiento

el rendimiento de este se encuentra entre un 2-10 % por lo que el real es mucho menor.

- Potencia consumida por el ventilador:

Según el fabricante del ventilador este consume una potencia de 2.21 W y 92 mA debido a su bajo consumo lo podemos conectar a cualquiera de las dos fuentes, gracias al sobredimensionamiento que hemos realizado en las fuentes no debe haber ningún sobre calentamiento.

- Potencia consumida por el sensor de temperatura y humedad:

Este sensor se alimenta con 3.30 V directamente desde el microcontrolador y tiene una corriente máxima de 2.50 mA por lo que:

$$P = 3.30 \text{ V} \times 2.50 \text{ mA} = 8.25 \text{ mW}$$

- Potencia total:

La potencia total del sistema será la suma de todas las calculadas anteriormente y nos sirve para dimensionar energéticamente el sistema:

$$P_t = 36.00 \text{ W} \times 2.00 + 3.60 \text{ W} + 2.21 \text{ W} + 0.00825 \text{ W} = 77.82 \text{ W}$$

Esto nos da una potencia total de 77.82 W que aproximaremos a 80.00 W para sobredimensionar, con esta potencia buscamos los componentes externos al prototipo como serían una regleta para conectar tanto las fuentes como el microcontrolador, así como un temporizador de pared los dos componentes son capaces de soportar 3500 W. De este modo evitamos el sobrecalentamiento de los componentes y nos aseguramos un correcto funcionamiento de todos los componentes.

3.5 Obtención de datos

En este apartado se explicarán los métodos usados tanto para el cultivo de las plantas como para la recogida de datos una vez se ha terminado cada experimento.

- **Cultivo:** para los experimentos se han usado lechugas (*Lactuca Sativa*) ya que tiene un crecimiento relativamente rápido de unos 15-30 días. En este tipo de cultivos se ve afectado su crecimiento por los cambios en iluminación, esto ayudará a comprobar si el sistema propuesto responde adecuadamente a los experimentos.

Para comenzar los experimentos se compraron 75 lechugas en bandeja a un semillero, una vez obtenidas las lechugas se trasplantaron a unas macetas de 0.40 L de capacidad (Figura 27) para que la planta pudiese arraigar correctamente.



Figura 27: Maceta de 0.40 L para las lechugas.

El proceso de trasplante comienza sacando la lechuga de la bandeja con la raíz y el tallo (Figura 28) con cuidado de no romperla, una vez sacada de la bandeja se introduce en la maceta citada anteriormente.

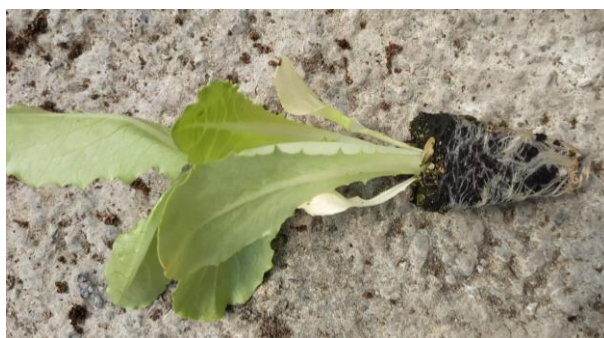


Figura 28: Lechuga “Romana” (*Lactuca Sativa*).

Esta maceta contiene turba húmeda y compactada, cuando se introduce la raíz de la lechuga se tapa con la turba de la maceta como vemos en la Figura 29 y se continúa el proceso con el resto de las lechugas.



Figura 29: Lechuga trasplantada.

- **Recogida de datos:** Durante toda la duración del experimento se mide la cantidad de solución que se le da a cada planta, así como la cantidad de solución que drena dicha planta, esta solución sobrante se mide y debe estar contemplada entre un 10-20 % de la cantidad con la que se riega. Además, cada dos días se medirá el pH y la conductividad eléctrica de la solución drenada con el fin de saber el estado de cada planta a lo largo del experimento.
 - Cada dos días se mide el drenaje de 3 plantas por cada tratamiento, es decir, 9 plantas en total. De estas plantas mediremos el volumen de agua que drena la planta al regarla, la conductividad eléctrica y el pH del agua drenada, así como el pH, CE, y volumen del agua con el que se riega. Estos datos nos servirán para valorar el estado de las plantas durante el experimento, asegurando que las plantas están sanas y tienen un crecimiento correcto.
 - Una vez ha pasado entre unos 15-30 días, que sería el tiempo de crecimiento de una planta de *Lactuca sativa* se procede al corte y recolección de datos en profundidad. En esta parte del experimento debemos obtener todos los datos que podamos de todas las plantas, para ello contamos el número de hojas, longitud del tallo, diámetro del tallo, volumen de raíz, peso fresco (hoja, tal y raíz) etc.... Para así comparar los resultados y las posibles discrepancias entre los distintos tipos de iluminación utilizados.

- **Cálculo del área foliar:** Para el cálculo del área foliar hemos utilizado dos técnicas.
 - **Aproximación mediante Raspberry Pi:** mediante el uso de la cámara de la Raspberry Pi se han realizado unas series de fotos de las plantas desde arriba con intención de poder tener una aproximación del área de las plantas antes de realizar el corte.
 - **Área foliar** mediante el programa ImageJ se puede calcular el área de todas las plantas que hemos cortado para el experimento. Este programa se basa en uso de distintos filtros para distinguir la hoja del fondo, gracias al uso de una regla se puede saber la distancia entre píxeles y con ello el área real de las hojas de cada planta.
 - Abrimos la imagen con el programa ImageJ (ImageJ, 2019) es fundamental que en esta imagen sepamos la medida exacta de algún objeto que aparezca, en nuestro caso una regla.



Figura 30: Hojas extendidas para una mejor medición.

- Introducimos la longitud de referencia en el programa, y ya podemos empezar a aplicar filtros de umbrales para quedarnos solo con el tamaño de las hojas.
- Como sólo queremos quedarnos con los colores verdes ajustamos el umbral para ellos.



Figura 31: Umbral de verdes.

- Seguimos aplicando umbrales hasta que tenemos toda la materia orgánica de color rojo.



Figura 32: Últimos umbrales aplicados.

- Con esto ya seleccionamos las hojas como se ve a continuación y el programa nos devuelve el área de todas las hojas en cm^2 .



Figura 33: Hojas seleccionadas para su cálculo de área.

- Para ir variando los umbrales para que solo localice los tonos de verdes utilizamos la herramienta Color Threshold (ver Figura 34).

Como se observa en la imagen de Figura 34 el ajuste de los tonos de color se realiza desplazando la barra, la segunda se ajusta la saturación, y el brillo con la tercera. Con los valores adecuados de las tres características de color (tono, saturación y brillo) se establece el borde e interior de cada hoja para el cálculo del área.

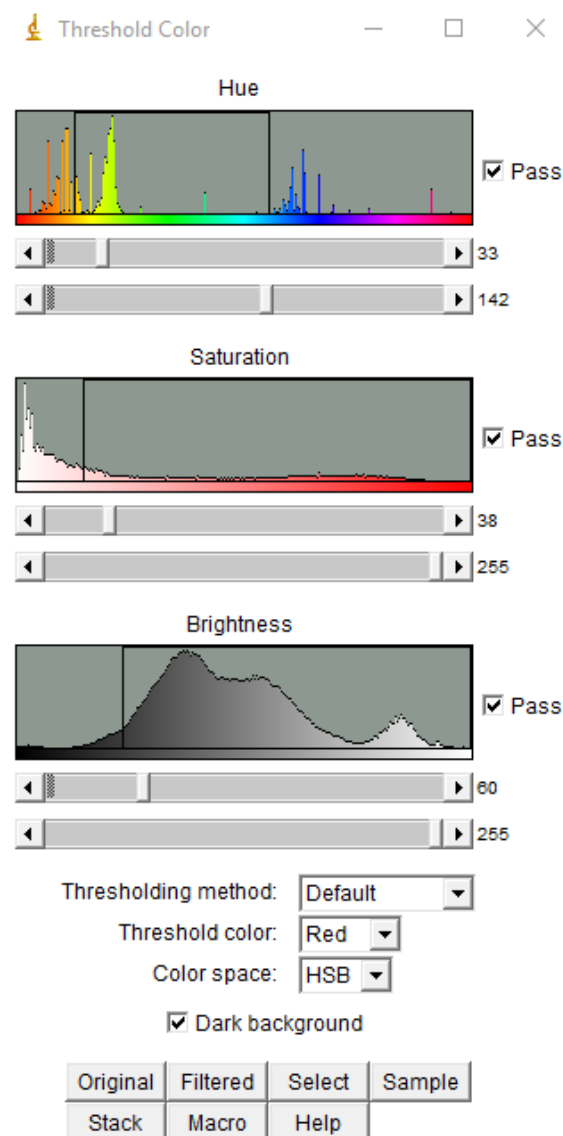


Figura 34: Ajuste de umbrales.

3.6 Métodos estadísticos de tratamiento de los datos

Los datos se sometieron a un análisis de varianza y sus promedios se comparan con una prueba de Tukey utilizando el programa de análisis estadístico Statgraphics Centurion® 18 (Warrenton, 2018). Donde las letras en mayúsculas indican las diferencias significativas con un valor de incertidumbre de $P \leq 0.05$ en una prueba de Tukey ($n=4$). Donde A indica una diferencia significativa con el resto de los valores tratados, B equivale a una menor diferencia significativa y AB equivale a una mínima diferencia significativa entre los valores.

Los intervalos mostrados están basados en el procedimiento de la diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher con un nivel de confianza del 95 %.

Capítulo 4. Diseño

En este capítulo se desarrollan los métodos usados para el diseño del sistema, así como su montaje y el software desarrollado.

4.1 Hardware

El microcontrolador Raspberry pi está provisto de numerosos pines de entrada y salida como vimos en el capítulo anterior. De todos estos pines solo necesitamos 7 para conectar nuestros sensores, así como la PCB de control de la iluminación.

Para el sensor de temperatura y humedad necesitamos el uso de 3 pines, uno para transmitir los datos que está conectado al GPIO4, otro pin para la alimentación de este, en este caso el dispositivo se alimenta a 3.30 V y como la Raspberry Pi está provista con 2 pines de 3.30 V no es necesario hacer nada, y por último la tierra que es común a todos los dispositivos.

Por otro lado, los pines GPIO 17, 22, 27 sirven para polarizar el transistor MOSFET y que pase corriente hacia la tira LED de esta forma controlamos el apagado y encendido de la tira, así como su intensidad. La alimentación proviene de una fuente externa de 24V DC y una potencia de 100 W ya que la tira funciona a 24 V y el microcontrolador no está provisto con una salida tensión de esta magnitud, como vemos en el esquema de

conexiones desde la PCB con los MOSFET salen los cables hacia la tira LED, así como su alimentación de 24V DC.

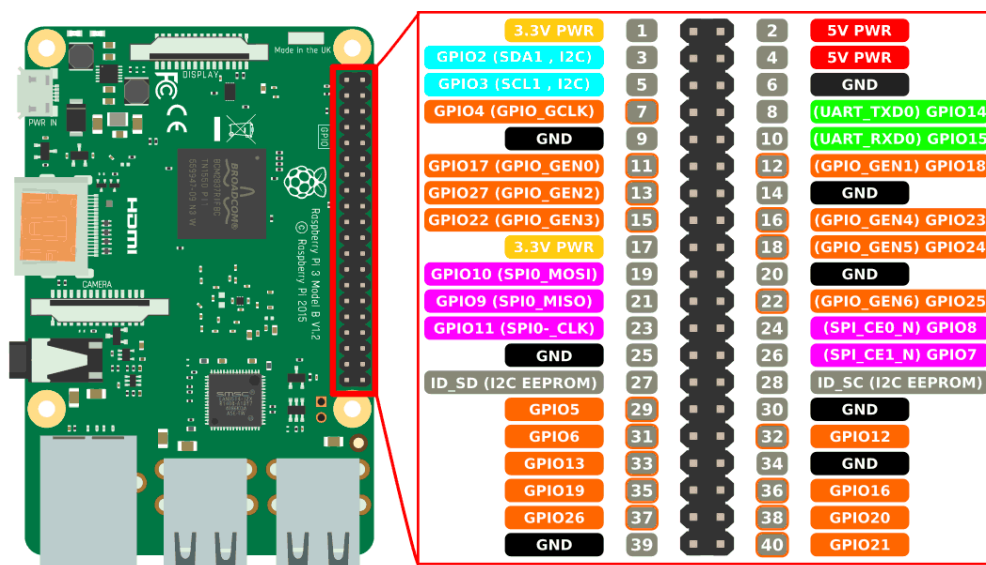


Figura 35: Pines de salidas entradas Raspberry Pi (Arateo, 2017).

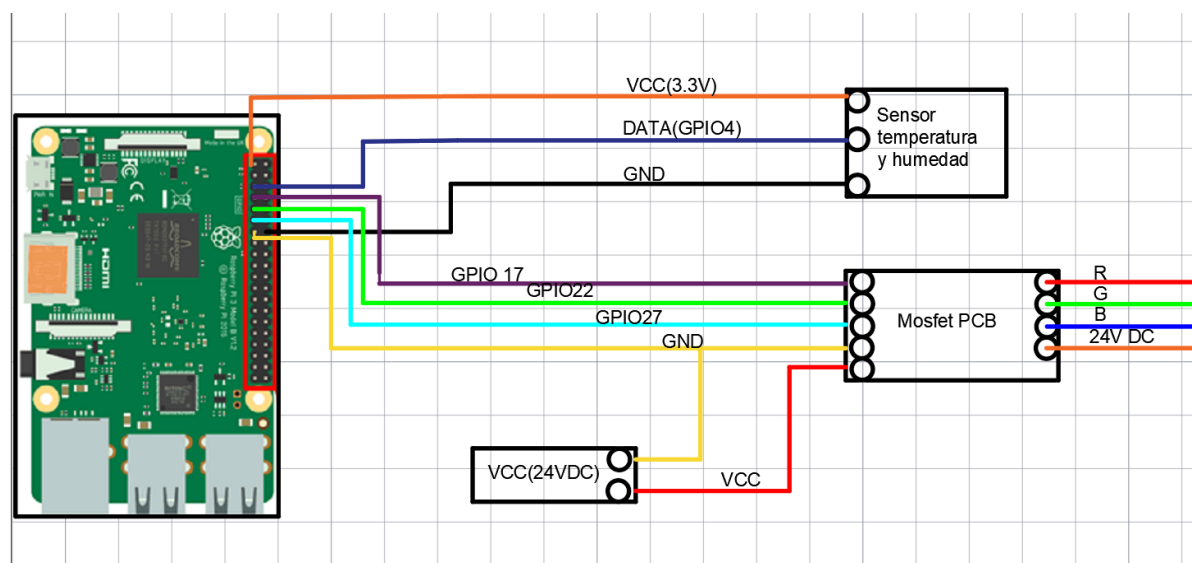


Figura 36: Esquema de conexiones del prototipo.

Todos estos dispositivos se han metido en una caja estanca de protección IP55 para evitar cualquier tipo de inconveniente durante los experimentos, ya que se va a trabajar en un entorno húmedo. Como vemos en la Figura 37 todos los dispositivos están dentro de la caja.



Figura 37: Organización de los componentes en la caja.

Como vemos en la imagen anterior la Raspberry Pi también cuenta con un ventilador para refrigerar el microcontrolador, este ventilador esta alimentado por la propia Raspberry Pi a 5V DC. También se han introducido disipadores para los transistores debido a que se calientan además teniendo en cuenta que el sistema funciona 16 horas al día era necesario que toda la caja tuviera una refrigeración adecuada.



Figura 38: Caja estanca IP55.

Debido a que el sistema consume mucha potencia para evitar sobrecalentamiento se ha instalado un ventilador para ayudar a la refrigeración. Este ventilador se alimenta de la fuente de 24V DC como vemos en la Figura 39. Además, crea un flujo de aire dentro de la caja que evita la posible condensación de agua dentro esta.



Figura 39: Ventilador de refrigeración.

El sensor de temperatura y humedad se encuentra fuera de la caja como vemos en la Figura 40, ya que se requiere las medidas a la que está sometido el experimento.



Figura 40: Sensor de temperatura y humedad.

Para la salida hacia la tira LED se han hecho dos agujeros en la caja, así como una salida para la cámara que se encargará de monitorizar las plantas durante los experimentos como vemos en la siguiente Figura 41.



Figura 41: Salida hacia la tira RGB y salida de cámara.

4.2 Software

Para este proyecto se ha usado de controlador el dispositivo Raspberry Pi 3 B+ que cuenta con un sistema operativo conocido como Raspbian que está basado en Linux/GNU.

Como lenguaje de programación se ha usado Python, este es un lenguaje de nivel alto orientado a objetos, además es un lenguaje modular y que cuenta con una gran cantidad de módulos y librerías lo que facilita la programación.

Para el proyecto se han usado los siguientes módulos y librerías:

- **Módulo time:** Se usa para el tiempo y los tiempos de espera.
- **Módulo Neopixel:** Esta librería sirve para controlar el color y el brillo de los LEDs, también nos sirve para direccionar los pixeles concretos que queremos encender o apagar.
- **Módulo PiCamera:** Esta librería controla la cámara y ayuda a hacer fotos y grabar videos, incluso se puede introducir filtros para el procesamiento de imágenes.
- **Módulo Datetime:** Esta librería sirve para introducir la fecha y el día
- **Módulo Adafruit_DHT:** Esta librería nos da la temperatura y la humedad dentro de la cámara, e incluso nos sirve para crear el lazo de control de la temperatura.
- **Modulo Pigiopio:** Esta librería controla los puertos GPIO (General Purpose Input/Output) nos sirve para mandar la señal de encendido de la tira LED, así como la intensidad que debe dar de 0-255.
- **Modulo OpenCV:** Esta librería sirve para crear un código que nos ayude con la visión artificial con el fin de llevar un control del área foliar de las plantas.

Para poder acceder al sistema remotamente se ha usado el protocolo VNC (Virtual Network Computing), que nos permite acceder al microcontrolador desde cualquier dispositivo que esté conectado a internet. En el microcontrolador está instalado el programa de servidor VNC y luego en otro dispositivo el de cliente, de este modo podemos ver en tiempo real el escritorio del microcontrolador y acceder a la información que queramos desde cualquier punto y en tiempo real (VNC, 2019).

El programa principal de funcionamiento se encuentra en la Figura 42.

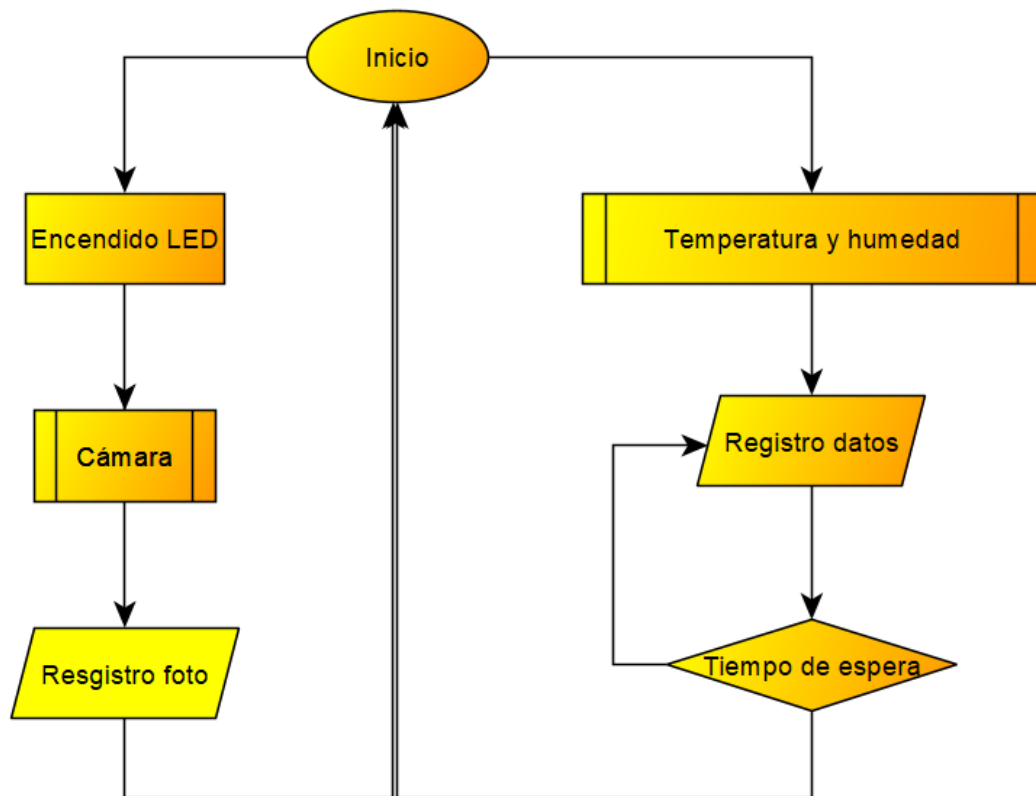


Figura 42: Programa principal.

El programa de iluminación consta de un bucle principal (Figura 43) que solo es necesario ejecutarlo una vez. Como método de seguridad anti-apagado se ejecuta el código de iluminación en el arranque del microcontrolador, si se va la luz en cuanto vuelva se volverá a cargar el código.

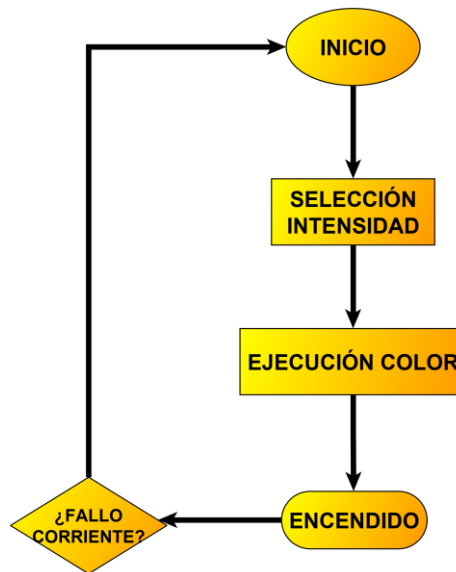


Figura 43: Diagrama de flujo encendido de luces.

Para el seguimiento de la temperatura y humedad se ha creado un script (Figura 44), éste nos proporciona una medición de temperatura y humedad cada hora todos los días mediante la medición del sensor DHT22 (sensor de temperatura y humedad). Estas mediciones se van guardando en un archivo del tipo txt con la fecha y la hora a la que se realizó para su análisis posterior. Con este programa se tiene un control de las condiciones que se dan en la cámara de crecimiento.

Para la aproximación del área foliar se ha creado el código descrito en la Figura 45, este código nos da una idea aproximada del área de la planta. Debido a la morfología de las lechugas sabemos que su crecimiento es circular por lo que podemos aproximar el área si encontramos el centro de la maceta, y a partir de aquí dibujamos un círculo de radio R hasta el extremo de las hojas. Como el radio es calculado lo único que nos queda es calcular el área de un círculo (Ec. 3):

$$A = \pi \times r^2 \quad (3)$$

Obteniendo así una aproximación del área foliar sin necesidad de cortar la planta.

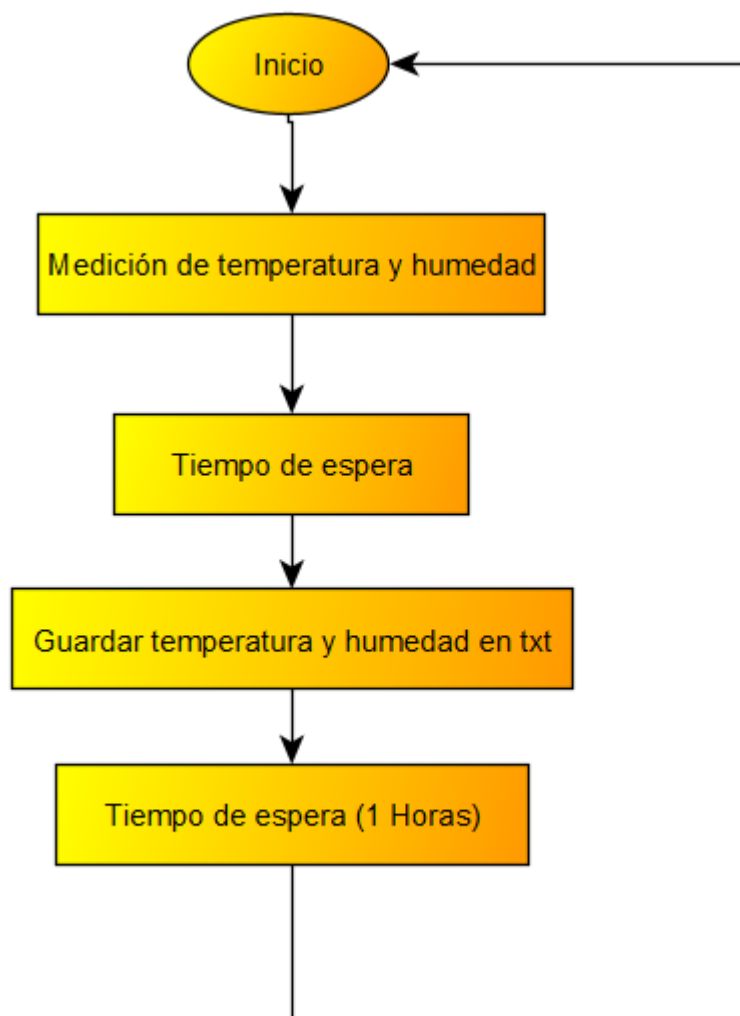


Figura 44: Diagrama de flujo recogida de datos temperatura y humedad.

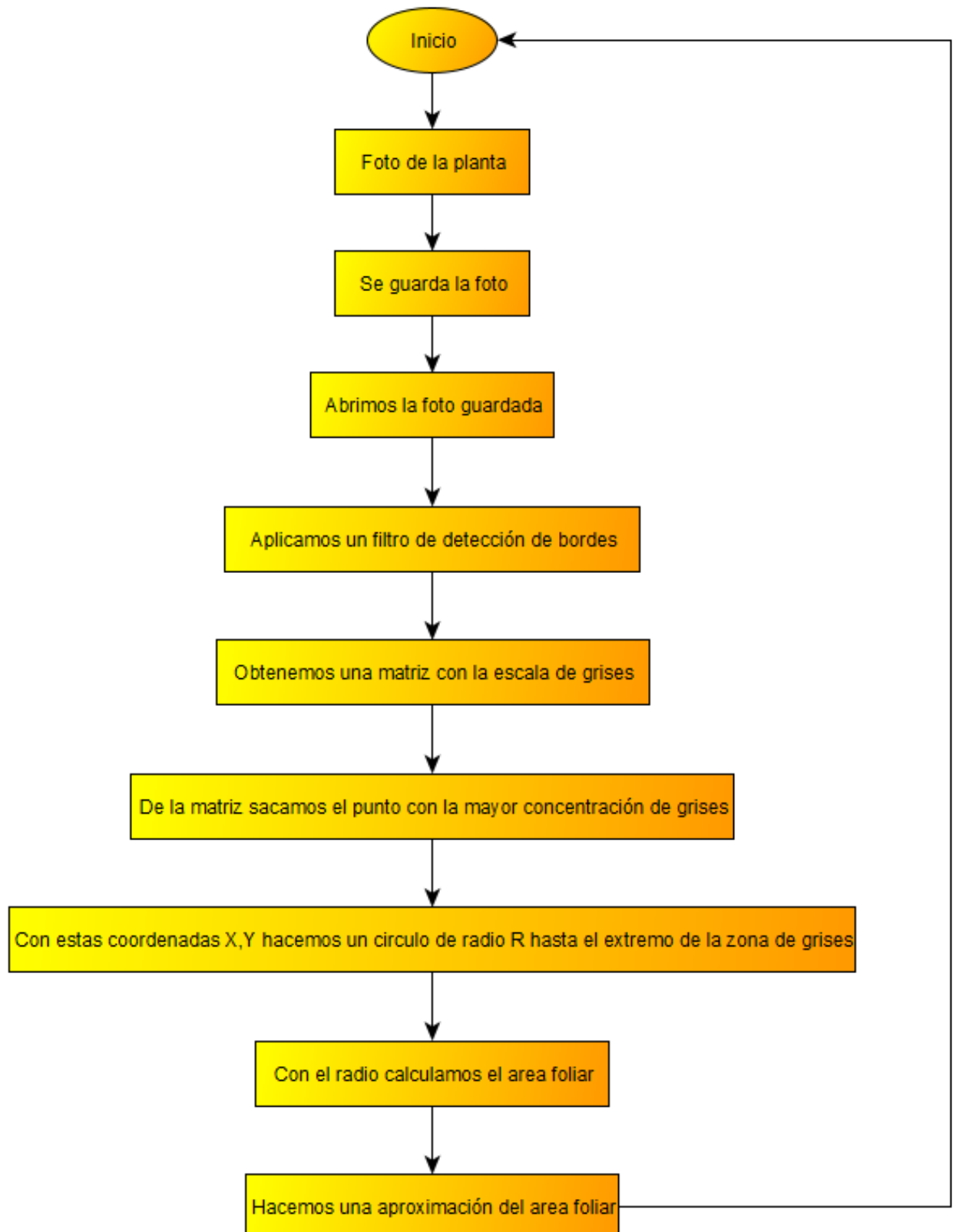


Figura 45: Diagrama de flujo de la aproximación del área foliar.

Capítulo 5. Resultados

En este capítulo se muestran los resultados de las medidas obtenidas del experimento de verificación del uso de iluminación LED propuesto. Las medidas se realizaron con el prototipo en funcionamiento instalado en una cámara de crecimiento con ambiente controlado y ventilación forzada. Estas medidas se realizaron en la cámara de crecimiento de la Universidad de Almería (Figura 46) perteneciente al departamento de Agronomía bajo la supervisión del Doctor Miguel Urrestarazu Gavilán.



Figura 46: Vista interior de la cámara de crecimiento Universidad de Almería. a: tratamiento T2 (L18 AP67), b: tratamiento T1 (L18 NS1) y b: tratamiento T3 (SMD 5050).

5.1 Medidas de pH y conductividad eléctrica

Durante el experimento se midió el pH de riego, la conductividad eléctrica, y el de drenaje cuyos datos se mostrarán a continuación de forma detallada. Estos datos se han ido recogiendo en las fechas que aparecen en las Figuras 47 a la 55. En todos los casos se escogieron 3 plantas al azar y luego se hizo la media de los resultados de las 3 plantas con lo que obtuvimos los datos promedios que se muestran en las figuras. Con los resultados del volumen de salida en función del de entrada permitió calcular la cantidad adecuada de agua abonada al resto de las plantas con esta iluminación para obtener un drenaje de salida entre 20 al 30% del líquido suministrado a la planta.

- **Tratamiento T1 (L18 NS1):** Para una mejor comprensión estos datos se han representado gráficamente en las figuras 47-49.

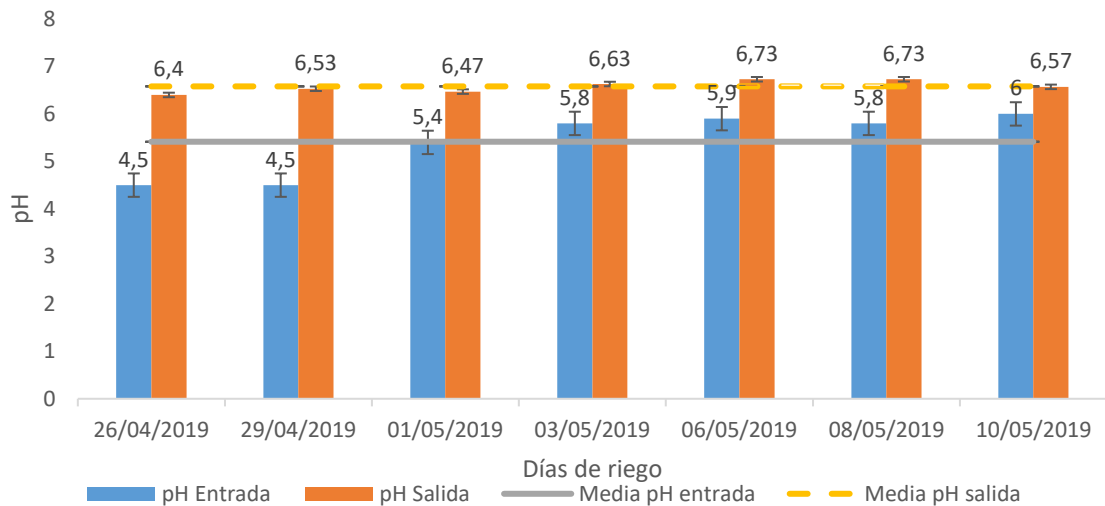


Figura 47: Comparación pH de entrada y salida del tratamiento T1 (L18 NS1).

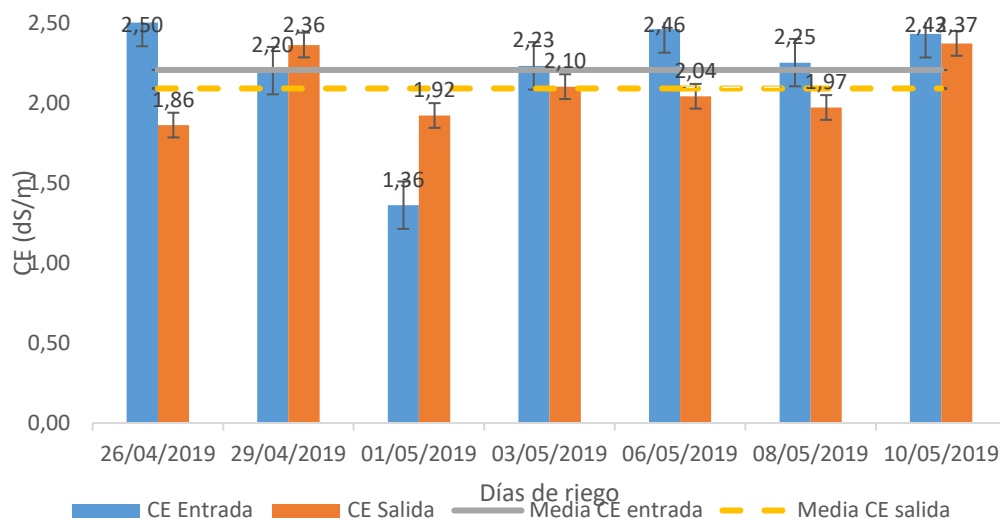


Figura 48: Conductividad eléctrica de entrada y salida del tratamiento T1 (L18 NS1).

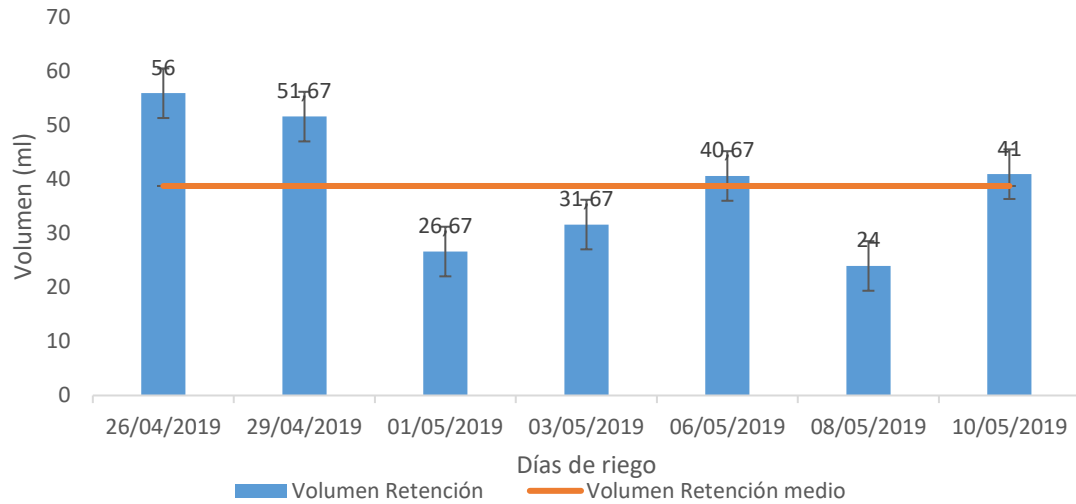


Figura 49: Volumen retención de la planta para el tratamiento T1 (L18 NS1).

Al analizar los datos propuestos anteriormente podemos decir que el crecimiento y el estado de las plantas es el de una planta sana. Esto lo sabemos si nos fijamos por ejemplo en la gráfica del pH (Figura 47), cuanto más se acerque el nivel de pH del drenaje al pH neutro es decir 7 más sana se encuentra la planta.

- **Tratamiento T2 (L18 AP67):** Se han obtenido los siguientes datos representado las Figuras 50-52.

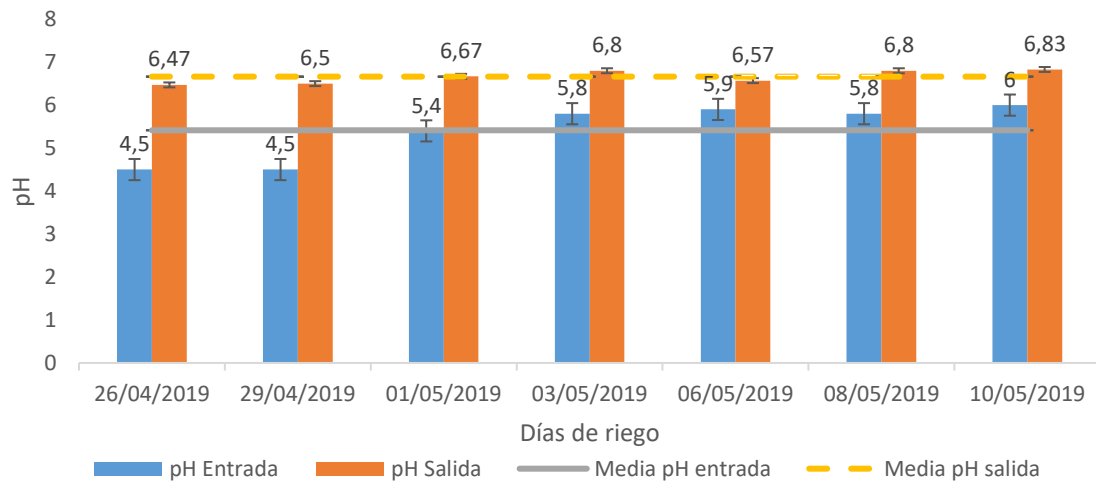


Figura 50: pH de entrada y salida para el tratamiento T2 (L18 AP67).

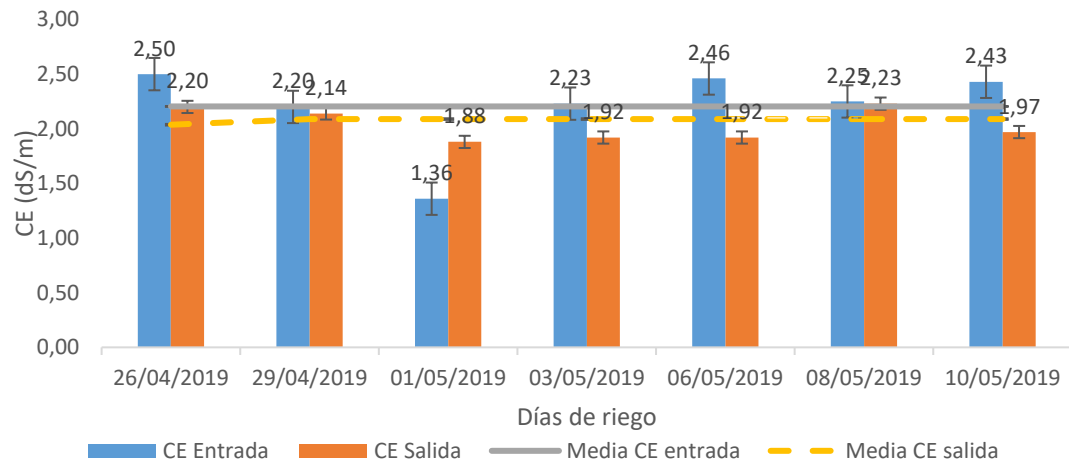


Figura 51: Conductividad eléctrica de entrada y salida tratamiento T2 (L18 AP67).

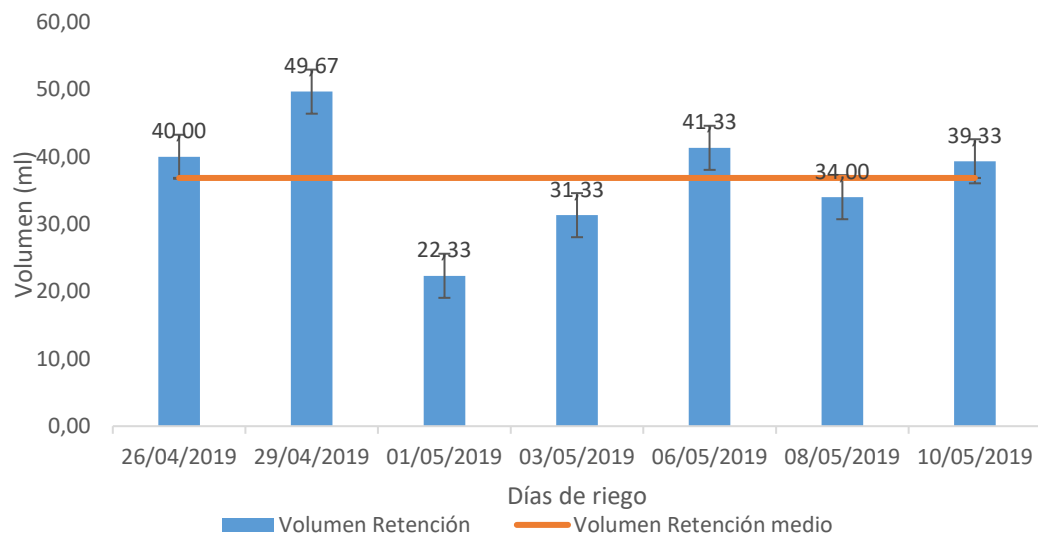


Figura 52: Volumen de retención para las plantas del tratamiento T2 (L18 AP67).

Al igual que para el tratamiento anterior primero nos fijamos en el pH de salida del drenaje, y al igual que antes vemos que se encuentra muy cercano al pH neutro.

- **Tratamiento T3 (SMD 5050):** Para nuestra iluminaria hemos representado los datos en las Figuras 53-55.

Sistema de control del crecimiento del cultivo mediante iluminación LED

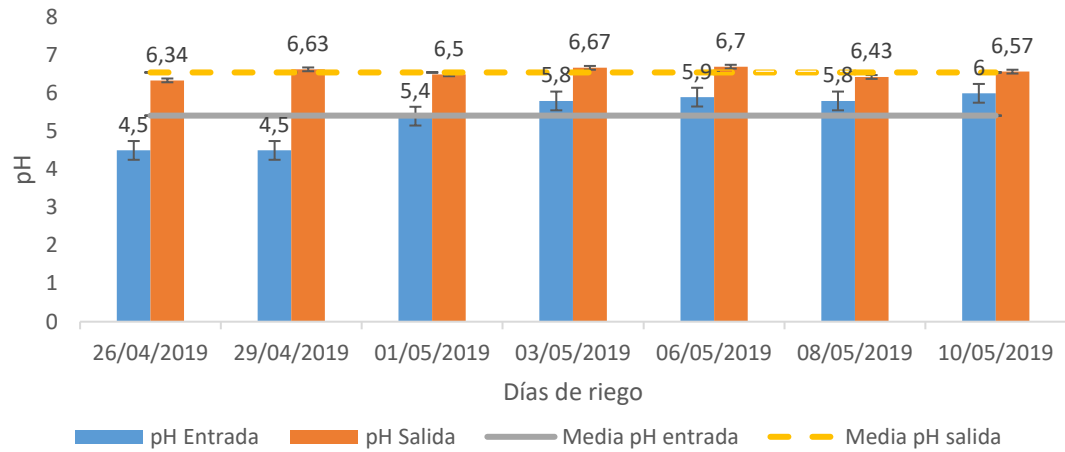


Figura 53: pH entrada y salida para el tratamiento T3 (SMD 5050).

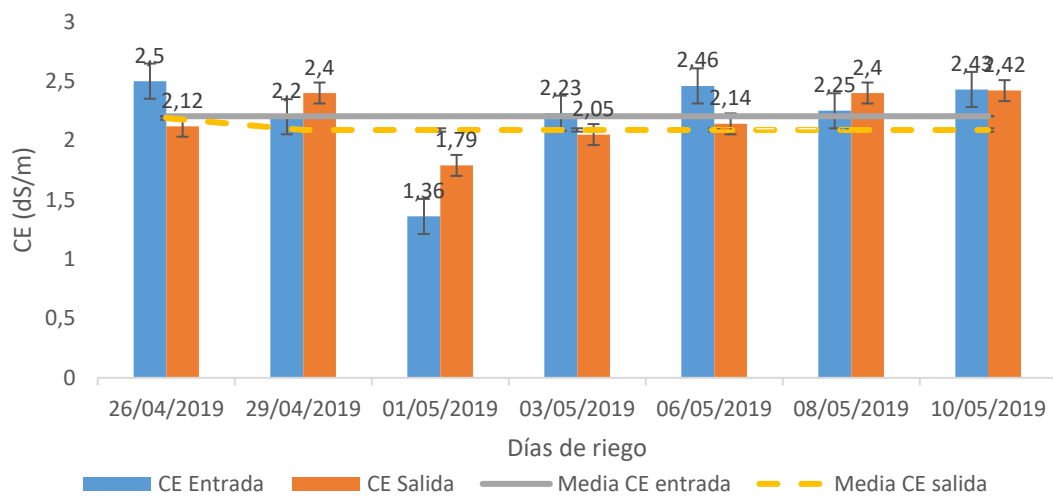


Figura 54: Conductividad eléctrica de entrada y salida para el tratamiento T3 (SMD 5050).

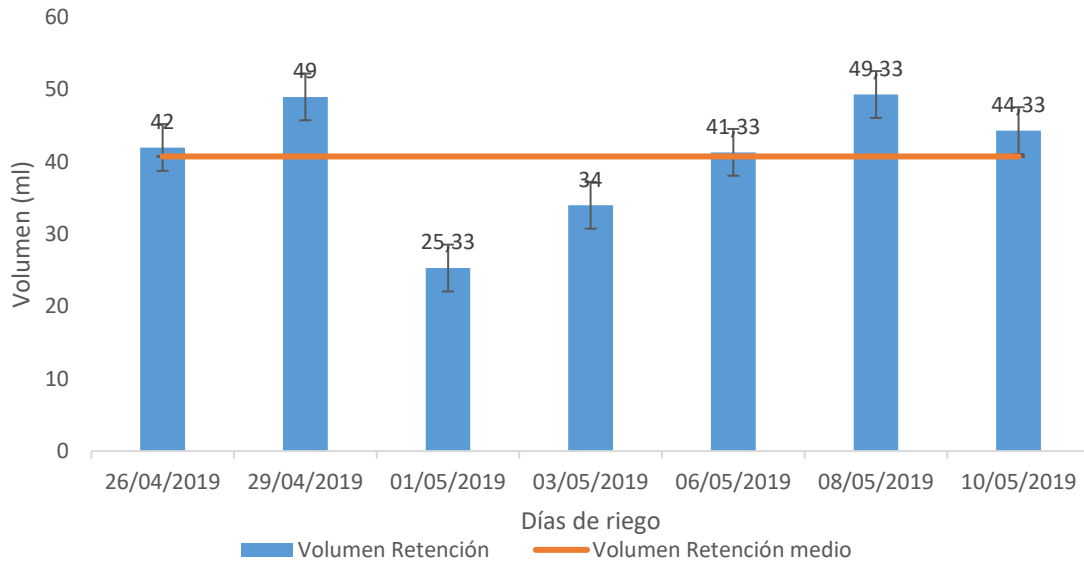


Figura 55: Volumen retención de las plantas para el tratamiento T3 (SMD 5050).

Como ya se comentó para los otros dos tratamientos el procedimiento es exactamente en mismo, en este caso el pH de salida al principio es un poco bajo no está cerca de 6 esto se debe a qué estos riegos se hicieron poco después de trasplantar la planta por lo que la planta tenía pocas raíces y poca influencia en el pH.

A la vista de los resultados de los valores medios mostrados en la Tabla 6 se puede resumir en que el crecimiento de las plantas ha sido el adecuado, ya que si nos fijamos en los valores de pH medios todos son muy similares, a simple vista no se aprecian diferencias significativas.

Parámetro Tratamiento	pH		CE (dS/m)		Volumen Retención (ml)
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	
T1	5.41	6.58 A	2.20	2.09 A	38.81 A
T2	5.41	6.66 A	2.20	2.04 A	36.86 A
T3	5.41	6.55 A	2.20	2.09 A	40.76 A

Tabla 6: Valores medios de pH, CE en entrada y salida y volumen de retención en las plantas respecto a cada tratamiento.

5.2 Datos obtenidos tras el experimento

En este apartado se exponen los datos obtenidos una vez realizado el experimento. Son los datos provenientes del corte de la planta, así como la medición de otros parámetros como volumen de raíz, diámetro, altura de tallo y área foliar, etc.

Para la medida de los pesos se realizó en cuatro tandas de cuatro plantas en cada una, donde se cortaron y midieron teniendo así un total de dieciséis plantas por tratamiento. El promedio de todos los datos obtenidos se muestra a continuación en las tablas 7 y 8:

Promedio Tratamiento	Peso fresco (g)			Peso seco (g)			Peso Fresco (g)	Peso seco (g)
	Raíz	Tallo	Hoja	Raíz	Tallo	Hoja	Total	Total
T1	2.39	3.79	14.62	0.67	0.51	2.34	20.81	3.51
T2	1.96	3.08	16.31	0.45	0.38	2.56	21.36	3.38
T3	2.67	3.23	17.59	0.97	0.43	2.80	23.50	4.20
Desviación	0.36	0.37	1.49	0.26	0.07	0.23	1.42	0.44

Tabla 7: Promedio y desviación peso fresco y peso seco para los tres tratamientos usados.

Promedio Tratamiento	Diámetro	Longitud	Grosor	Volumen	Longitud
	Tallo (cm)	Tallo (cm)	Hoja (mm)	Raíz (ml)	Raíz (cm)
T1	5.76	1.19	0.19	2.25	6.74
T2	5.68	1.24	0.19	1.88	8.94
T3	6.83	1.42	0.18	2.50	6.80
Desviación	0.64	0.12	0.01	0.31	1.25

Tabla 8: Promedio de longitud de tallo y raíz, diámetro de tallo, grosor de hoja y volumen de raíz de los tres tratamientos usados.

Los datos representativos son el peso fresco y seco totales de cada tratamiento, en este caso podemos apreciar que el tratamiento T3 (SMD 5050) es un 13 % mayor que el T1 y un 10 % respecto a T2 en peso fresco. En cuanto a peso seco T3 respecto a T2 es un 24 % mayor y un 20 % mayor respecto a T1. Teniendo en cuenta los datos aquí expuestos como los estudios estadísticos, podemos decir que existen diferencias significativas entre los tratamientos comerciales T1 (L18 NS1) y T2 (L18 AP67) con respecto al prototipo que aquí se propone, siendo notablemente mayores los datos obtenidos para el tratamiento del prototipo T3 (SMD 5050) como se muestra en la Tabla 9.

Tratamiento	Fresco (g)			Seco (g)			Longitud
	Raíz	Tallo	Hoja	Raíz	Tallo	Hoja	Raíz
T1	2.39 AB	3.79 B	14.40 B	0.67 AB	0.51 A	2.34 B	6.74 B
T2	1.96 B	3.08 B	15.81 AB	0.45 B	0.38 B	2.56 AB	8.94 A
T3	2.67 A	3.23 AB	17.59 A	0.97 A	0.43 AB	3.17 A	6.80 B

Tabla 9: Prueba de múltiples rangos al 95 % LSD (Warrenton, 2018).

En la Tabla 9 podemos ver los resultados obtenidos tras realizar un análisis de la varianza y sus promedios se compararon mediante una prueba de Tukey. Diferentes letras mayúsculas entre las filas indican diferencias significativas a $P \leq 0.05$ en un test de Tukey ($n=4$). Como se aprecia en la Tabla 9 si empezamos a analizar los resultados vemos que para peso fresco de raíz el tratamiento T3 (SMD 5050) obtiene la diferencia más significativa como también pasa para el peso de hoja fresco, raíz y hoja seca. En peso de tallo también tiene una diferencia significativa el tratamiento T3 (SMD 5050) respecto los otros, pero no es tan notable como la mencionada anteriormente.

Área foliar: mediante el programa ImageJ se ha procedido a calcular el área foliar de cada planta. Una vez se obtuvo el área, se agruparon en conjuntos de cuatro plantas y se hizo el promedio obteniendo así los datos que se observan a continuación.

Tratamiento	Área (cm ²)	Media (cm)	Min (cm)	Max (cm)
T1	403.12 A	96.86	30.00	208.00
T2	401.28 A	97.91	39.00	188.00
T3	405.06 A	89.91	26.00	219.00

Tabla 10: Promedio del área foliar para los tres tratamientos de luz.

Al aplicar el análisis estadístico a los valores de área foliar se obtuvo que no existen diferencias significativas entre el área foliar de las plantas. Se obtuvo un área un 0.94 % mayor de T3 (SMD 5050) sobre T2 (L18 AP67) y un 0.48 % mayor respecto a T1 (L18 NS1).

5.3 Temperatura y humedad en la cámara

Durante el transcurso del experimento se ha ido registrando la temperatura y humedad dentro de la cámara obteniendo así la siguiente tabla donde se muestran la temperatura y humedad media por día, así como la temperatura y humedad media exterior. Los datos externos son registrados en el Aeropuerto, próximo a la Universidad de Almería, y suministrado por la Aemet en su página web.

Para una mejor comprensión de los datos recogidos se han representado los datos gráficamente.

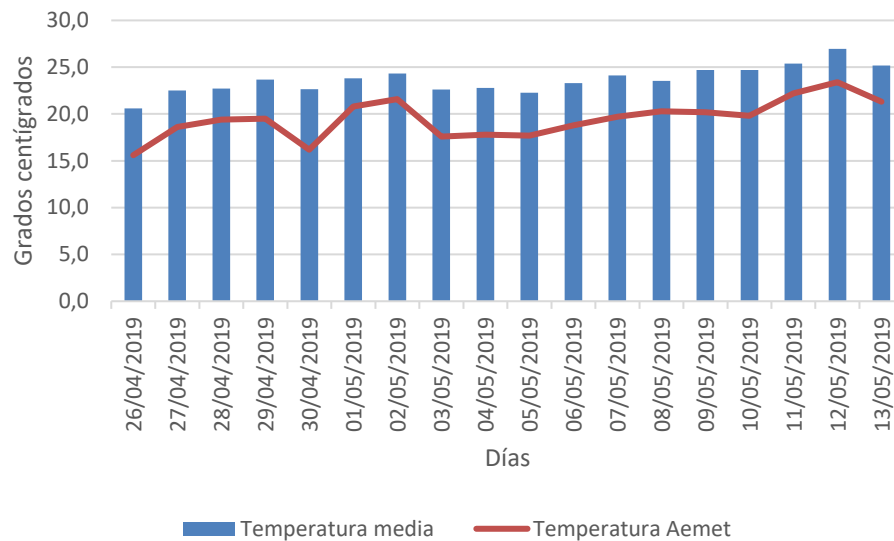


Figura 56: Temperatura media en la cámara y en el exterior.

A simple vista se puede apreciar como la temperatura se ha ido manteniendo constante en el interior de la cámara (Figura 56 barras azules) mientras que la temperatura externa ha ido variando más y se ha mantenido por debajo de la temperatura interior. Aunque se observa la ventilación de la cámara que hace que haya pequeñas fluctuaciones que tienen una correlación con los cambios externos de temperatura ambiental.

Para la humedad en este caso tenemos más variación tanto en la humedad interna como la externa, esto se debe a las lluvias que se produjeron a finales de abril y principios de mayo. Esta lluvia provoca un cambio repentino en la humedad como podemos ver en la Figura 57, en los últimos días no tuvimos precipitaciones abundantes por lo que la humedad se mantuvo más estable hasta el final del experimento. Aunque también se ve una leve correlación entre la humedad interna/externa, esta correlación es menos acusada que con la temperatura, a pesar de que ambas son debidas a la ventilación de la cámara.

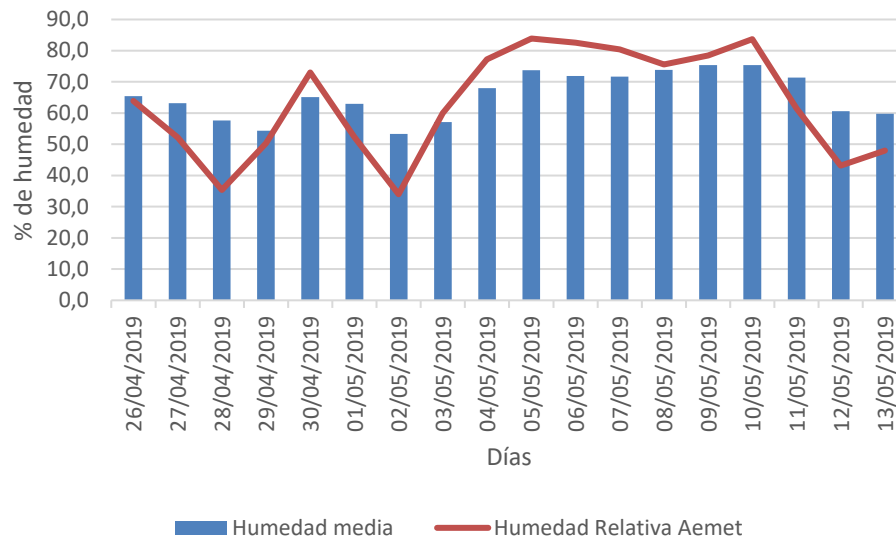


Figura 57: Humedad relativa media en la cámara y en el exterior.

Con estos datos podemos afirmar que la ventilación que se ha aplicado a la cámara es la apropiada ya que se han mantenido unas temperaturas y humedad constantes a lo largo de todo el experimento.

5.4 Potencia consumida por los sistemas

Aquí se exponen los datos de consumo eléctrico total del conjunto de la cámara, así como los consumos individuales por tratamiento.

Gracias a un contador digital que ha ido registrando la potencia durante todo el experimento sabemos que el conjunto de los tres tratamientos consumió una potencia promedio de 142.06 W por hora, teniendo en cuenta esto obtenemos lo siguiente:

$$142.06 \text{ Wh} \times 16 \frac{\text{día}}{h} = 2273.01 \text{ Wdía}$$

Para todo el conjunto, individualmente tenemos que el tratamiento T1 (L18 NS1) y el tratamiento T2 (L18 AP67) consumen 36 W por hora cada uno esto nos da un consumo diario de:

$$72.00 \text{ Wh} \times 16 \frac{\text{día}}{h} = 1152.00 \text{ Wdía}$$

Sistema de control del crecimiento del cultivo mediante iluminación LED

Para nuestro prototipo (tratamiento T3) tenemos un consumo por hora de 57.60 W por hora por lo que:

$$57.60 \text{ Wh} \times 16 \frac{\text{día}}{\text{h}} = 921.60 \text{ Wdía}$$

El consumo de nuestro prototipo es aproximadamente el doble que el de los otros dos tratamientos esto se debe a que tenemos un microcontrolador y dos fuentes externas para alimentar las tiras LED. Sabiendo que nuestro controlador consume alrededor de unos 7 W cuando está en funcionamiento, 4 W de consumo por parte del ventilador de refrigeración y 8.82 W por parte del sistema de control de iluminación nos queda que nuestro sistema de iluminación, es decir, solo las luces consumen:

$$57.60 \text{ Wh} - 7.00 \text{ Wh} - 4.00 \text{ Wh} - 8.82 \text{ Wh} = 37.78 \text{ Wh}$$

Si las tiras funcionasen a 230 V como los otros dos tratamientos bajaríamos considerablemente el consumo del prototipo ya que estas fuentes consumen la mayor parte de la potencia del prototipo entero.

El sistema propuesto consume más porque no consta sólo del control de la iluminación (sistema embebido e iluminación) sino de sensores de control de la cámara (humedad y temperatura), cámara para visualización online del crecimiento de las plantas, conexión WIFI para telecontrolar el sistema a distancia, un temporizador para el control de la iluminación de la cámara y un ventilador para refrigerar el prototipo. En términos de gasto energético teniendo en cuenta solo el gasto en iluminación tenemos la Tabla 12.

Tratamiento	Potencia (Wh)	Coste por día (€)
T1	36.00	0.07
T2	36.00	0.07
T3	37.78	0.08

Tabla 11: Coste energético de las iluminarias de cada tratamiento.

En términos de iluminación en función del rendimiento económico se ha creado la siguiente tabla.

Tratamiento	Precio (€)	Potencia (Wh)	Vida útil (años)	Rendimiento (€/año)	Rendimiento (€/Wh)
T1	55.00	36.00	10.00	5.50	1.53
T2	55.00	36.00	10.00	5.50	1.53
T3	25.00	37.78	5.20	4.81	0.66

Tabla 12: Rendimiento económico de las luminarias usadas en cada tratamiento.

Se aprecia una diferencia de precio importante entre los tratamientos T1 (L18 NS1, T2 y T3 aproximadamente la diferencia entre las luminarias comerciales y la de nuestro prototipo es el del doble. Pero si nos fijamos en la vida útil las luminarias comerciales doblan en tiempo de vida a la luminaria usada en el prototipo, haciendo que prácticamente el rendimiento global sea muy parecido, solo apreciándose una diferencia importante en el rendimiento €/Wh donde la luminaria usada en el tratamiento T3 presenta mejores prestaciones que las otras dos.

Un dato importante para analizar también sería la eficiencia del sistema en cuanto a consumo por iluminación, es decir, averiguar la eficiencia de la luminaria y saber si parte de la potencia se ha perdido o no por eso se ha creado la siguiente tabla comparando la potencia con los lux de cada tratamiento.

Tratamiento	Potencia (Wh)	Iluminancia (Lux)	Rendimiento (Lux/Wh)
T1	36.00	1012.23	28.12
T2	36.00	1147.40	31.87
T3	37.78	1123.00	29.72

Tabla 13: Rendimiento lumínico de las tres luminarias utilizadas en los tres tratamientos.

A la vista de los datos podemos decir que la luminaria T2 emite más lux por cada vatio que consume, pero como las diferencias entre las tres luminarias son mínimas podemos decir que las tres están optimizadas.

5.5 Espectro utilizado

En la Figura 58 se representa el espectro irradiado por nuestro prototipo, en función de la longitud de onda, intensidad y tiempo de exposición.

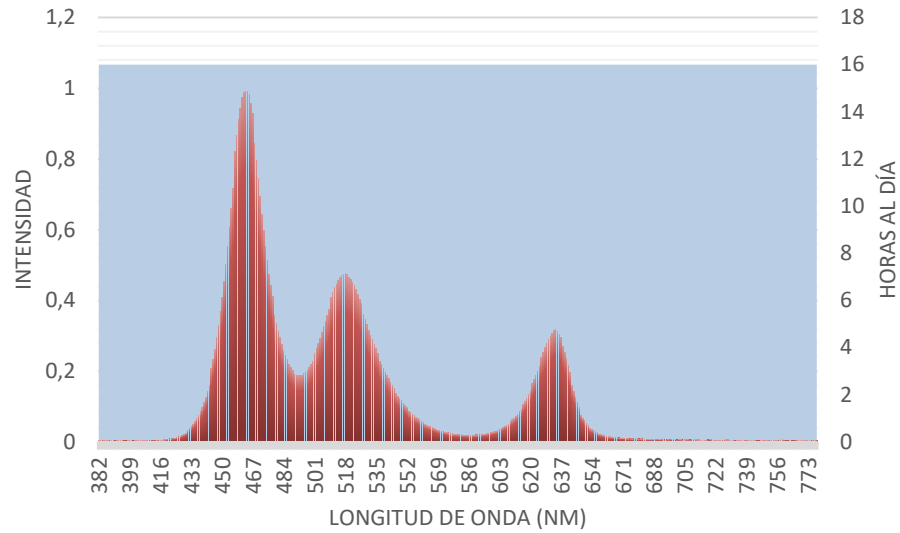


Figura 58: Espectro de luz aplicado por el prototipo.

Como vemos en la imagen el espectro utilizado por nuestro sistema tiene un pico en la longitud de onda de 463 nm que equivale al color azul en el espectro visible. Luego tiene otro pico un poco menor en 520 nm que equivale al color verde del espectro visible, y por último un pico de intensidad en 628 nm que equivale al color rojo.

Capítulo 6. Conclusiones

En este capítulo se aportan las conclusiones al trabajo en base a los resultados obtenidos y se aportan nuevas ideas para mejorar el prototipo en el futuro.

6.1 Conclusión

El origen del presente trabajo es tratar de desarrollar un sistema capaz de incidir en el desarrollo de las plantas en aquellas áreas que permitan un abaratamiento de los costes de producción; al tiempo que se mejora la productividad. Para ello se teoriza que un control de la intensidad y longitud de onda proporcionada a la planta durante el proceso de crecimiento puede tener un efecto positivo sobre el desarrollo del cultivo. Es la comprobación de esta hipótesis la que da lugar al desarrollo e implementación de un sistema que, además de controlar los ya mencionados parámetros (Longitud de onda e Intensidad), permite el control de la adquisición, almacenamiento y grabado de los datos además del control remoto del sistema desde cualquier dispositivo.

Por lo que respecta al desarrollo e integración del hardware y software, es necesario mencionar que para desarrollar el prototipo ha sido necesario la creación de un sistema de control de iluminación LED, objeto de la hipótesis inicial, y un sistema adicional de monitorización del cultivo conformado por una gran variedad de funciones tales como el control de la longitud de onda e intensidad que le llega a la planta y la monitorización de la temperatura y humedad de la cámara de crecimiento mediante sensores. Este

sistema adicional cuenta también la posibilidad de visualización en directo del cultivo gracias a una cámara instalada en el prototipo para este fin.

El principal factor para evaluar al objeto de ratificar o invalidar la hipótesis inicial es la obtención de unas plantas de lechuga de mayor o igual calidad que las obtenidas con los tratamientos comerciales disponibles. El análisis de los resultados obtenidos (Capítulo 5) permite afirmar que nuestro sistema obtiene plantas de alta calidad en plazos de 20 días. Estas plantas son más fuertes y con una mayor biomasa debida a la inducción del crecimiento mediante la variación de la luz, es decir tiene mejores resultados que con las luces comerciales.

Por lo que respecta a la relación existente entre los distintos espectros aplicados al cultivo y los efectos logrados sobre los mismos; los datos recogidos indican que el uso de un espectro con más tonalidades azules (longitudes de onda con un pico en 460 nm) favorecen la aparición de un mayor número de raíces y tallos con mayor grosor, en contraposición a los otros dos tratamientos que se centran en las tonalidades rojas (longitudes de onda con un pico en 600 nm). Para este tipo de cultivo y a objeto de obtener una mayor producción sería necesario cambiar el espectro para que abarcase más tonalidades de rojos y de esta forma hubiésemos obtenido más cantidad de peso con nuestro tratamiento. Estas modificaciones se deberían tener en cuenta para futuros experimentos que se realicen con este tipo de cultivo, ya que el espectro con el que se irradia el cultivo depende del tipo de planta y de sus características.

En términos de iluminación nuestro sistema consume 1.78 W más que los otros dos tratamientos, lo que equivale a una diferencia de 0.03 € al día. Por lo que la diferencia en términos de iluminación es casi despreciable, en conjunto nuestro sistema completo con los sensores, microcontrolador, sistema de control de las luces, y ventilador consumen alrededor de 57.60 W.

Centrándonos en el rendimiento en términos de euros por vatio nuestra luminaria sale más rentable a corto plazo, ya que su precio es más de la mitad que el de una luminaria comercial para ser más exactos sale un 67 % más barato. Si bien es cierto que las luminarias comerciales aseguran una vida útil de diez años, mientras que nuestra luminaria tiene una vida útil de cinco años, aun siendo así por el precio de una luminaria

comercial se podrían comprar dos luminarias de las usadas por nuestro prototipo y seguiría siendo más barato. Por el contrario, si nos basamos en la luminiscencia de las tres luminarias, es decir, el rendimiento que existe entre la potencia que consumen y la luz que emiten, podemos apreciar que las tres luminarias utilizadas tienen aproximadamente la misma eficiencia por lo que no destaca ninguna en este aspecto.

6.2 Trabajo futuro

Aunque el objetivo principal se ha cumplido, siempre hay espacio para la mejora y la introducción de nuevas funciones. Para que el prototipo sea competitivo en el mercado es necesario mejorar su aspecto tanto exterior como interior, así como las conexiones tanto internas como externas. Se tendría que acomodar el prototipo en una caja o cuadro eléctrico, para que todos los componentes del controlador no entren en contacto con el agua y humedad que puede haber en una cámara de crecimiento.

Como objetivo a largo plazo, se intentará crear un sistema autónomo de crecimiento usando la cámara para analizar imágenes de las plantas y así ajustar el espectro del dispositivo. De esta manera se irradiarán las plantas con la longitud de onda que necesiten en cada etapa de crecimiento consiguiendo así mejores resultados. También se podría crear un programa de descarga de datos en un USB para obtener los datos directamente del prototipo en caso de que se situase en un sitio sin internet.

También sería de gran interés probar distintos tipos de tiras LED para encontrar la relación optima entre crecimiento del cultivo y el consumo energético por lo que se podrían probar tiras LED a distintas alimentaciones o sistemas comerciales compatibles con nuestro prototipo. Teniendo una gran aplicación en cultivos de vertical farming donde ya se están implementado sistemas de iluminación para favorecer el crecimiento del cultivo.

Otra opción es que se podría introducir una pantalla táctil al prototipo con el fin de controlar la iluminación desde el mismo dispositivo, así como introducir un control de clima, con el fin de crear un sistema completo de control de cámaras de crecimiento.

En temas de investigación se podría seguir probando la influencia de distintas longitudes de onda en distintos tipos de plantas para ver cómo afecta la luz morfológicamente a las plantas. Como puede ser aplicar cambios al espectro de luz irradiada para producir cambios significativos en la pigmentación de las hojas de los cultivos. Así como ver el efecto que provoca estresar el cultivo mediante un espectro variante o un espectro, por lo que en este ámbito hay muchas posibles líneas de investigación para proseguir con el prototipo.

Bibliografía

Agritecture (2019). [image] Available at: <https://www.agritecture.com/events-listing/2018/10/1/five-day-introductory-vertical-farming-training-course> [Accessed 19 Mar. 2019].

Araiza, E. A. R., Rosales, A. R., Rivera, E. D. A. (2018). Desarrollo de un sistema embebido móvil de bajo costo utilizando la tarjeta beaglebone black y programas de código abierto. Pistas Educativas, pp. 36(112).

Arateo. (2017). Raspberry Pi [Image]. Retrieved from <https://www.atareao.es/raspberry/raspberry-pi-y-un-LED-rgb/>

Arduino Mega. (2019). [Image]. Retrieved from <https://aprendiendoarduino.wordpress.com/tag/arduino-mega/>

Bailey, F. (1972). Introduction to semiconductor devices; diodes. bipolar transistors. JFETs. IGFETs. SCFs and integrated circuits. London: Allen and Unwin.

Barret, S. F., Kridner, J. (2013). Bad to the Bone: Crafting Electronic Systems with BeagleBone and BeagleBone Black. Synthesis lectures on digital circuits and systems, 8(2), pp. 1-430.

Barrett, S. F., Pack, D. J. (2012). Atmel avr microcontroller primer: Programming and interfacing. Synthesis Lectures on Digital Circuits and Systems, 7(2), pp. 1-244.

Berkovich, Y. Konovalova, I., Smolyanina, S., Erokhin, A., Avercheva, O., Bassarskaya, E., Kochetova, G., Zhigalova, T., Yakovleva, O., Tarakanov, I. (2017). LED crop illumination inside space greenhouses. REACH. 6. pp.11-24.

Bula, R., Morrow, R., Tibbitts, T., Barta, D., Ignatius, R., Martin, T. (1991). Light-emitting Diodes as a Radiation Source for Plants. HortScience, 26(2). pp.203-205.

Bures. S., Urrestarazu. G. M., Kotiranta. S. (2018). Iluminación artificial en agricultura [on-line]. Bibl. Hort.

BricoGeek. (2019). [Image]. Retrieved from <https://tienda.bricogeek.com/accesorios-raspberry-pi/822-camara-raspberry-pi-v2-8-megapixels.html>

Chen Lopez, J. (2018). La influencia de la luz en el crecimiento del cultivo | PRO-MIX. [online] Pthorticulture.com. Available at: <https://www.pthorticulture.com/es/centro-de-formacion/la-influencia-de-la-luz-en-el-crecimiento-del-cultivo/> [Accessed 6 Nov. 2018].

Cornillon, P. (1987). Influence de la température des racines sur la croissance et la nutrition des plantes. En Les cultures hors sol., pp. 221-234. Paris: INRA.

Eitudela (2019). Union PN Silicio. [image] Available at: <http://www.etitudela.com/Electrotecnia/electronica/01d56993840f26d07/01d56994e30f40632/index.html> [Accessed 19 Mar. 2019].

Elegoo. (2019). Relé de 4 canales [Image]. Retrieved from <https://www.elegoo.com/product/elegoo-4-channel-dc-5v-relay-module-with-optocoupler/>

Evolución precio LED. (2019). [image] Available at: <http://blog.setech.es/evolucion-precio-LED> [Accessed 19 Mar. 2019].

Gupta. S. D., Dutta Agarwal. A. (2017). Light Emitting Diodes for Agriculture. Springer: Singapore.

HID vs CFL vs LED. (2019). Retrieved from <https://hydronz.co.nz/hid-vs-cfl-vs-led-grow-lights-best/>

National Institutes of Health. (2019). ImageJ (Version 1.50i) [Windows/Mac/Linux].

Johkan, M., Shoji. K., Goto. F., Hahida. S.,Yoshihara. T. (2012). Effect of green light wavelength and intensity on photomorphogenesis and photosynthesis in *Lactuca sativa*. *Environmental and Experimental Botany*, 75, pp.128-133.

Khan Academy. (2018). *Luz y pigmentos fotosintéticos*. [online] Available at: <https://es.khanacademy.org/science/biology/photosynthesis-in-plants/the-light-dependent-reactions-of-photosynthesis/a/light-and-photosynthetic-pigments> [Accessed 6 Nov. 2018].

LEDrgb.es (2019). Fuente alimentación 24V DC. [image] Available at: <http://www.LEDrgb.es/producto/fuente-encapsulada-100w/> [Accessed 31 Mar. 2019].

Liu. S., Luo. X. (2010). LED Packaging for Lighting Applications: Design. Manufacturing and Testing. John Wiley Sons.

Llenares Galiana. J., Page del Pozo. A. (1997). Electromagnetismo y semiconductores. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.

Max Electrónica. (2019). Sensor de temperatura y humedad DHT22 [Image]. Retrieved from <http://www.maxelectronica.cl/temperatura-y-humedad/165-sensor-de-temperatura-y-humedad-modelo-dht22.html>

McCree, K. (1971). The action spectrum. absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. *Agricultural Meteorology*, 9, pp.191-216.

McCree, K. J. (1972). Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data. *Agricultural Meteorology*, 10, pp. 443-453.

Morrow, R.C. (2008). LED lighting in horticulture. *HortScience*, 43, pp.1947–1950.

Novikov, M. (2004). Oleg Vladimirovich Losev: Pioneer of semiconductor electronics (celebrating one hundred years since his birth). *Physics of the Solid State*, 46(1), pp.1-4.

Olle, M., Viršile, A. (2013). The effects of light-emitting diode lighting on greenhouse plant growth and quality. *Agricultural and Food Science*, 22(2), pp.223-234.

Pham, C. (2014). Communication performances of IEEE 802.15. 4 wireless sensor motes for data-intensive applications: A comparison of WaspMote. Arduino MEGA. TelosB. MicaZ and iMote2 for image surveillance. *Journal of Network and Computer Applications*, 46, pp. 48-59.

Patrón, J. S., Díaz, L. V., Solano, M. V. (2013). Diseño e implementación de algoritmo para el procesamiento de imágenes en sistemas embebidos. *Ingeniería y Región*, 10, pp. 41-53.

Prieto, G. (2019). Horas de luz al año. Available at: <https://www.geografiainfinita.com/2017/07/reparto-las-horas-sol-mundo/> [Accessed 11 Feb. 2019].

Roberts-Hoffman, K., Hegde, P. (2009). ARM cortex-a8 vs. intel atom: Architectural and benchmark comparisons. Dallas: University of Texas at Dallas. 5.

Sonneveld, C., Straver, N., (1994). Voedingsoplossinger voor groenten en bloemen geteeld in water of substraten (Nutrient solutions for vegetables and flower grown in water or substrates). 10th ed. Proefstation voor Tuinbouw order Glas, Naaldwijk, Netherlands

Staff, S. (2019). Lighting Comparison: LED vs High Pressure Sodium (HPS) and Low-Pressure Sodium (LPS). [online] Stouchlighting.com. Available at: <https://www.stouchlighting.com/blog/LED-vs-hps-lps-high-and-low-pressure-sodium> [Accessed 11 Feb. 2019].

Urrestarazu, M., Nájera, C., del Mar Gea, M. (2016). Effect of the spectral quality and intensity of light-emitting diodes on several horticultural crops. *HortScience*, 51(3), pp. 268-271.

Urrestarazu, M., Postigo, A., Salas, M.C., Sánchez, A., Carrasco, G., (1998). Nitrate accumulation reduction using chloride in the nutrient solution on lettuce growing by NFT in semiarid climate conditions. *Journal of Plant Nutrition*, 21, pp. 1705–1714. doi: 10.1080/01904169809365515.

VNC Services. (2019). VNC (Version Server 2016) [Windows/Linux/Android].

Winder, S. (2016). *Power supplies for LED driving*. Newnes.

Raspberry, P. I. (2017). Raspberry Pi 2 Model B. *Raspberrypi.org*. Retrieved from <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/>